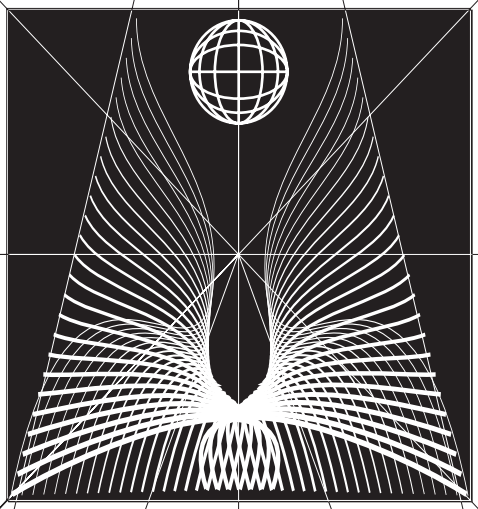
Министерство Образования и Науки Российской Федерации

Министерство Транспорта
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№1(17)
2008

Редакционная коллегия

А.П. Хоменко - Профессор,
главный редактор, ИрГУПС

С.В. Елисеев - профессор,
зам.главного редактора, ИрГУПС

Ю.Ф. Мухопад,, профессор ИрГУПС
С.И. Носков, профессор ИрГУПС
А.В. Крюков, профессор ИрГУПС
С.В. Белокобыльский, профессор БрГТУ
В.Я. Баденников, профессор АГТА
Ю.Н. Резник, профессор ЧГУ
И.В. Бычков, директор Института динамики систем и
теории управления СО РАН
А.И. Артюнин, профессор ИрГУПС
H. Humphreys, UK

Журнал издается с 2004 г.

Ответственный за выпуск С.В.Елисеев
Дизайн и макет издания Е.В.Хохрин
Компьютерная верстка А.В. Димов

© Издательство Иркутского Государственного Университета Путей Сообщения

Министерство Образования и Науки Российской Федерации
Министерство Транспорта
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. Механика. Транспорт. Машиностроение.

Хоменко А.П., Лукьянов А.В. Пневматические элементы в схемах управления динамическим состоянием виброзащитных систем 6

Белокобыльский С.В., Ситов И.С. Особенности структуры вибрационного поля двумерного объекта в системе обобщенных координат "смещение - угол поворота" и соответствующих координатам обобщенных силах 18

Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Рычажные механизмы в системах балочного типа 23

Кобзов Д.Ю., Дэлэг Д., Жмуров В.В., Лханаг Д. Модернизация конструкции опор гидроцилиндра привода ковша одноковшовых гидрофицированных дорожных и строительных машин 28

Кузнецов Н.К. Гашение упругих колебаний управляемой машины с помощью дополнительных упругих элементов 34

Банина Н.В., Гозбенко В.Е. Математические модели и динамические свойства связанных систем (вынужденные колебания) 37

Белых А.В., Белоусов О.Г. Многоступенчатое лабиринтно-винтовое уплотнение вала центробежного насоса 42

Мельниченко О.В., Михальчук Н.Л., Димов А.В., Мельниченко Т.Н. Разработка комплексной автоматической заправки и диагностики букс с постоянным уровнем смазки моторно-осевых подшипников электровозов 47

Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Компьютерное моделирование динамики переменного тягового тока в рельсах под катушками АЛСН 55

Белокобыльский С.В., Кашуба В.Б. Оценка возможностей динамических взаимодействий рабочего блока и корпуса технологической машины для вибрационного заглаживания бетонных поверхностей 61

Сигачев Н.П., Тюпин В.Н. Безопасность жизнедеятельности при выбросе бесстыкового железнодорожного пути от температурного и вибродинамического воздействия 68

Соболев В.И., Готовский Д.С. Методика расчета на сейсмические воздействия многоэтажных зданий с упругопластическими и кинематическими виброизоляторами 72

Раздел 2. Управление в технических системах. Моделирование.

Закарюкин В.П., Крюков А.В . Асташин С.М. Учет возмущений во внешней сети при имитационном моделировании систем тягового элекроснабжения 78

Шаманов В.И., Пультяков А.В. Марковская модель процесса технического обслуживания и ремонта устройств автоматики 81

Кузнецов Н.К., Перелыгина А.Ю. Исследование эффективности управления колебаниями на основе трехмассовой расчетной схемы 85

Министерство Образования и Науки Российской Федерации
Министерство Транспорта
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 2. Управление в технических системах. Моделирование (продолжение).

D.Yu. Kobzov, Lhonag Dorligsuren, Deleg Dorjbjol. Dialectical approach to the insight into engineering objects evolution 93

Носков С.И. Точечная характеризация множества Парето в линейной многокритериальной задаче 99

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Арсентьев П.О. Моделирование режимов трехфазно-однофазных электрических систем при синхронных качаниях генераторов 102

Мадыев А.П., Ширапов Д.Д. Определение дисперсии первой производной асимптотически нестационарных сигналов типа переходный режим и анализ ее общих свойств 106

Дмитриева Т.Л. Аппроксимация параметров состояния в задачах оптимизации систем, подверженных нестационарным динамическим воздействиям 110

Раздел 3. Системный анализ и междисциплинарные подходы в исследованиях.

Летников Ф.А. Синергетика природных и техногенных воздействий человека 117

Хоменко А.П., Елисеев С.В., Засядко А.А. Формирование концепции вибродиагностических методов неразрушающего контроля. Современные представления 153

Упырь Р.Ю., Насников Д.Н., Логунов А.С. Особенности передачи механических воздействий в механических цепях с ограниченным числом степеней свободы 173

Зоркальцев В.И., Казазаева А.В., Мокрый И.В. Модель взаимодействия трех пелагических видов организмов озера Байкал 182

Белоусов К.Н., Бутырин О.В., Носков С.И. Методика оценки результатов экспертизы в решении многокритериальных задач 194

Печенкина В.В, Арбатская Н.А. Оценка экономико-производственных показателей работы железных дорог на основе дисперсионного анализа 196

Дмитренко А.В. Принципы развития экономики стран мира на перспективу 199

Карнаухова В.С., Краковская Т.А. Выбор новых специализаций для сферы услуг 204

- **Ученые России** 207
- **Аннотации опубликованных статей** 210
- **Сведения об авторах** 217

Уважаемые коллеги!
Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

Статья представляется на дискете и в распечатанном виде. Рекомендуемый объем статьи до 8 стр.

К статье прилагаются:

!1) акт экспертизы; две внешние рецензии ведущих специалистов;

!2) индексы УДК или ББК;

!3) сведения об авторах: название учреждения (кафедры), **фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность**, контактный телефон и E-mail;

!4) реферат по образцу:

УКД 621.879

Иванов АЛ, Петров Б.Б. Совершенствование систем разработки угольных месторождений //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2004. - №1. - с. 8-15

Рассмотрены способы разведки залежей скважинами и горными выработками, задаваемыми в пространстве через равные расстояния.

Ил. 2. Табл. 2. Библ. 7 наим.

Количество знаков в реферате - не более 400.

Индексы УДК или ББК, сведения об авторах и реферат предоставляются на дискете в виде файла с расширением *.DOC.

5) **Текст статьи** должен быть представлен **на дискете 3.5,** проверенной на отсутствие вирусов, в **виде файла с расширением *.DOC** - документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий, **и распечаткой** на стандартных листах формата А4 (210х297 мм) в одну колонку.

При наборе статьи в Microsoft Word с учетом формата издания рекомендуются следующие установки:

- параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу - 2.5 **см;** слева и справа - **2 см; табуляция - 2 см;** ориентация - книжная;
- шрифт - **Times New Roman,** размер - 12, межстрочный интервал - одинарный, перенос слов - автоматический;
- При вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются ***курсивом;*** для греческих букв и символов назначать фонт (шрифт) Symbol, для остальных элементов - фонт **Times New Roman** (использование букв русского алфавита в формуле нежелательно). Размер символов: обычный - 12 пт, крупный индекс - 7 пт, мелкий индекс - 5 пт, крупный символ - 18 пт, мелкий символ - 12 пт. Все экспликации элементов формул в тексте также необходимо выполнять в виде формул.

6) **Рисунки,** вставленные в текст статьи, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W - для черно-белых иллюстраций, Grayscale - для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм, представлены **на дискете** в виде файла с расширением *.BMP, TIFF **и распечаткой** на стандартных листах формата А4, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе MS Word или в MS Exsel, с приложением файлов.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться:

г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15. Офис А-101.

Иркутский государственный университет путей сообщения.

телефоны: **(8-3952)59-84-28**

Факс: **(8-3952) 59-84-28**

Елисеев Сергей Викторович, Богатов Максим Юрьевич

Email: eliseev_s@inbox.ru

Министерство Образования и Науки Российской Федерации
Министерство Транспорта
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

Раздел 1.

Механика. Транспорт.
Машиностроение.

Содержание научного журнала:

Инженерная механика
Транспортные средства
Энергетика и электромеханика
Строительство, материалы и конструкции
Охрана окружающей среды
Автоматизация технологических процессов
Современные технологии
Системный анализ
Моделирование технических систем
Транспортные системы
Энергоснабжение и электромеханика
Управление техническими системами
Информационные технологии
Экономика безопасности и качества

Хоменко А.П., Лукьянов А.В.

УДК 629-752

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СХЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ

Транспортные устройства в плане решения проблем защиты от вибраций и ударов являются сложными объектами. С одной стороны, в силу их энергетической насыщенности, сами они выступают как генераторы возмущений широкого частотного диапазона, а с другой стороны - находятся в динамическом взаимодействии с окружающей средой, способной и проводить и рассеивать вибрации.

Как показывает инженерная практика, ограничение большого числа параметров динамического взаимодействия не всегда является эффективным подходом. Более рациональным представляется подход, основанный на методах структурной декомпозиции объекта, выборе исходных моделей, отражающих основные энергетические и динамические свойства, что позволяет в дальнейшем детализировать задачу и искать ответ в классе реализуемых инженерно-технических решений [1,2].

Использование, энергии специальных источников для изменения параметров системы вибрационной защиты или формирование активного динамического противодействия привело к дальнейшему развитию тех разделов теории автоматического управления, которые позволяют формировать воздействия в режиме реального времени. Теоретические и экспериментальные исследования позволили существенно расширить представления о возможностях таких систем, спектр их физических свойств и пределов упрощения моделей, обеспечивающих учет основных факторов влияния.

Пневматические элементы, как активные средства, обладают достаточной перспективой для использования в различных транспортных устройствах. Главным в выборе и построении расчетных моделей является разумное упрощение исходных схем, если это не входит в противоречие с очевидными физическими представлениями.

Особенности больших систем, а к ним можно было бы отнести крупногабаритные конструкции, состоящие из набора элементов или блоков, представляется разумным усматривать в деформируемости объекта, что предполагает рассмотрение новых эффектов и физических процессов. Применение программных средств для реализации методов конечных элементов позволяет развить подходы, приводящие к возможности расчленения объекта на ряд связанных между собой твердых тел с последующим применением уже разработанных и апробированных приемов.

Создание таких адаптируемых к внешним возмущениям систем может рассматриваться как развивающийся процесс усложнения исходных моделей от одномерных к многомерным с редукцией до задач пространственной виброзащиты и виброизоляции, как определенный методологический подход, позволяющий каждом этапе строить вполне обозримые модели в классе динамики управляемых систем.

Последовательное изучение возможностей активных элементов и их систем в задачах управления колебаниями позволило создать и разработать научно-методическую основу для применения современных методов теории систем автоматического управления и реализовать в расчетах метод. Комплексный характер решения задач виброзащиты и виброизоляции требует в выборе вариантов конструкторско-технического исполнения разумных компромиссов, обеспечивающих учет основных физических свойств объектом.

Проблемы динамики подвижного состава получили в научно-технической лите-

ратуре достаточно подробное освещение. Многие вопросы динамики, в приложении к конкретным объектам, получили реальное воплощение в виде новых конструкций амортизирующих, демпфирующих устройств. Большую роль сыграло внедрение пневмоподвесок в современном транспорте, на железной дороге. Вполне уверенно можно говорить о том, что динамическое состояние подвижного состава стало возможным вводить в определённые рамки, создавая систему управления уровнем вибрации, если обеспечивать и поддерживать соответствующую работоспособность систем подрессоривания.

Вместе с тем, наметилась и необходимость дальнейших поисков новых конструкций элементов виброзащитных систем, среди которых определилось и направление, связанное с активными пневматическими устройствами; определилось и оригинальное осмысление возможных новых подходов к задачам снижения динамических нагрузок. Оно заключается в том, что позволяет от рассмотрения задач виброзащиты и виброизоляции одного объекта (например, вагона) перейти к управлению вибрационным состоянием связки таких объектов (поезда). Для этого потребуются не только управляемые элемент, но и достаточно сложные системы управления. Поэтому от управления динамическим состоянием одного объекта можно переходить к управлению динамическим состоянием сложной технической системы. На современном техническом уровне такие задачи представляются вполне решаемыми, однако в этом направлении необходима предварительная работа и в плане поиска эффективных управляемых элементов, а также в разработке новой идеологии. Последнее заключается, в частности, в том, чтобы ввести в рассмотрение новые расчётные схемы или, иначе говоря, предложить адекватные математические модели. Целесообразным представляется в связи с этим, в качестве первого шага, остановиться на моделях объектов в виде систем, состоящих из упругих элементов с распределёнными параметрами, работающих в связке с упругоопёртыми фрагментами в виде твёрдых тел.

I. Предполагается что пространственный объект, находящийся на движущемся основании, будет защищаться от действия кратковременных ударных импульсов ускорения и вибрации широкого спектра в условиях ограничения на габаритные и весовые характеристики системы амортизации.

В воздействии на объект можно выделить три оставляющих инерционной нагрузки, действующих на объект защиты (ОЗ) через основание:

1.постоянно действующее, знакопостоянное ускорение, медленно меняющееся с течением времени (ускорение переносного движения основания);

2.широкополосное вибрационное ускорение, передаваемое от основания на объект защиты (ОЗ);

3.чередующиеся ударные импульсы ускорения большой интенсивности, также передаваемые от основания.

В соответствии с приведённой классификацией инерционной возмущающей нагрузки, задачу амортизации можно разбить на следующие подзадачи:

1.стабилизация ОЗ относительно движущегося основания; получение заданных характеристик виброзащиты в широком диапазоне возмущающих частот и нагрузок;

2.обеспечение заданных энергопоглощающих характеристик за счёт снижения реакции ОЗ на удар и уменьшения времени затухания свободных колебаний ОЗ.

Рассмотрим возможности решения поставленных задач с помощью пневматической системы амортизации (ПСА). Такая система характеризуется относительной простотой управления её параметрами, хорошей фильтрующей способностью, малым весом и приемлемыми габаритными размерами. При этом ПСА может быть рассмотрена в составе двух подсистем:

1.стабилизация ОЗ (подсистема активного типа);

2.амортизация ОЗ (подсистема пассивного типа с возможностью управления параметрами).

Из возможных вариантов выполнения ПСА в виде пневмоцилиндров, сильфонов или шлангов, выбран последний, в виду его хороших несущих и весовых характеристик. Подсистема стабилизации предлагаемой конструкции выполнена на основе 4 секций гибких шлангов большого диаметра (рис.1), постоянно находящихся в поджатом состоянии и крепящихся по средней линии между 03 / и основанием *2.* Гибкие шланги большого диаметра или несущие пневмо-элементы (НПЭ) *3* соединены через трехпозиционные золотни-

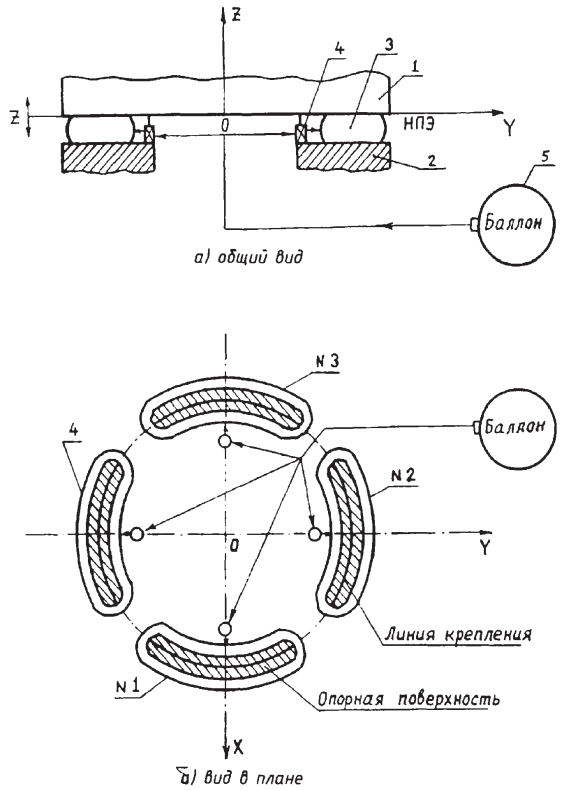


Рис. 1. Принципиальное устройство пневматической системы амортизации.

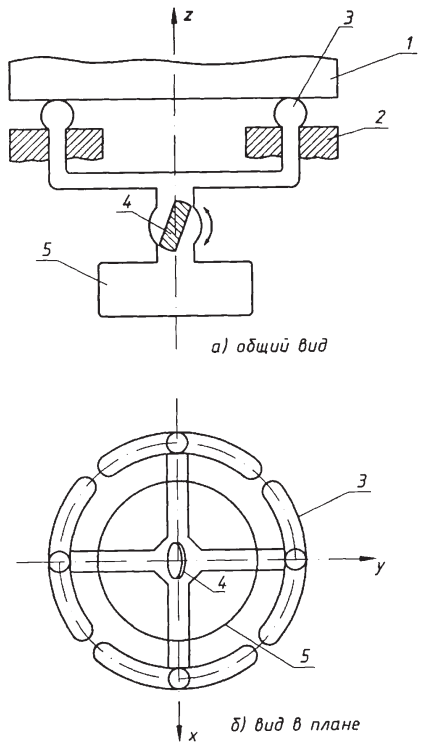


Рис. 2. Схема управления в системе амортизации.

ки *4* с источником сжатого воздуха *5*. Подсистема стабилизации служит только для компенсации статического смещения ОЗ относительно основания, возникающего при движении основания с ускорением, качке и т.д. Компенсация смещения производится путем подачи в НПЭ дополнительной массы воздуха из баллона или стравливание в атмосферу через трехпозиционный золотник, установленный на основании и связанный штоком с объектом защиты. НПЭ должны иметь малую статическую жесткость.

Подсистема амортизации выполняется на основе гибких шлангов (рис. 2), соединенных по средней линии ОЗ и основания, находящихся при статическом равновесии ОЗ в недеформированном состоянии. На рис. 2 принят ряд обозначений: объект защиты ОЗ-1, основание — 2. Шланги малого диаметра *3* или упругие пневмоэлементы (УПЭ) сообщаются через управляемый перекрывной кран *4* с полостью дополнительного объёма *5.* Давление воздуха в УПЭ и в полости дополнительного объёма одинаково и в общем случае выше, чем в НПЭ. Поэтому суммарная жесткость пневмоэлементов будет определяться, в основном, жесткостью УПЭ и не будет зависеть от величины переносного ускорения основания. Изменяя давление воздуха в УПЭ и подключая дополнительный объём, можно регулировать жесткость системы амортизации в широких пределах, тем самым получая желаемые характеристики вибро- и ударозащиты.

II. Для нормального функционирования упругий пневматический элемент (УПЭ) должен быть выполнен из гибкого, нерастяжимого материала, например, из резинокордного. В положении равновесия ОЗ УПЭ должен находиться в недеформированном состоянии и иметь в сечении окружность. В работах [1,3] получены статические характеристики пневмоэлементов, выполненных в виде пневмоцилиндра и резинокордной подушки. Используя аналогичные соотношения, найдём упругую реакцию пневмоэлемента, выполненного в виде шланга. На рис. 3 показаны сечения УПЭ в трех положениях: деформация вниз (а); положение равновесия (б); деформация вверх (в). Считая, что УПЭ имеет нерастяжимую оболочку, получим зависимость между величиной деформации z и площадью сечения S_0 или объемом V_0 УПЭ:

$$V_0(z) = S_0(z) \cdot L, \qquad (1)$$

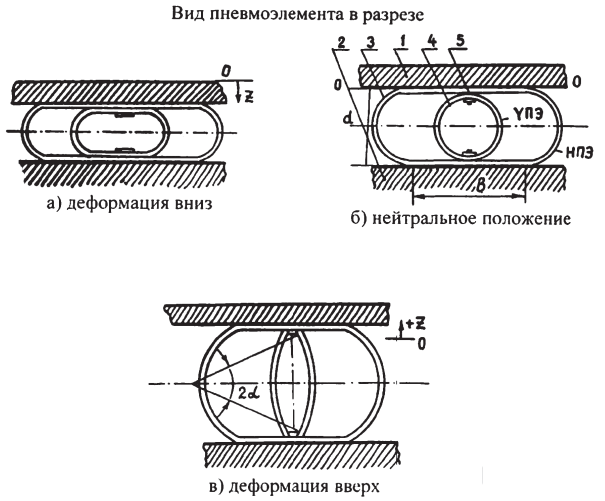


Рис. 3. Возможные схемы деформации в сечениях пневматических элементов.

где L - суммарная длина УПЭ.

Отметим, что изменение объема УПЭ пропорционально изменению его сечения S. Перейдем к относительным единицам:

$$\overline{V}_0 = \frac{V_0}{V_{00}} = \frac{S_0}{S_{00}}. \qquad (2)$$

На рис. 4 приведена зависимость

$$\overline{V}_0 \text{ от } \overline{z}_i = \frac{z_i}{d}, \qquad (3)$$

где z_i - величина деформации i-ого УПЭ от его нейтрального положения; d - диаметр сечения УПЭ.

При деформации УПЭ вниз

$$\overline{V}_{0i} = 1 - \overline{z}_i^2, \qquad (4)$$

а при деформации вверх $\overline{V}_{0i}$ определяется из системы уравнений —

$$\overline{V}_{0i} = \frac{\pi(2\alpha - \sin 2\alpha)}{4\alpha^2}, \qquad (5)$$

$$\overline{z}_i = \frac{\pi \cdot \sin\alpha}{2\alpha} - 1. \qquad (6)$$

Зависимости $(4) \div (6)$ могут быть аппроксимированы полиномом 4-ой степени

$$\overline{V}_{0i} = 1 - 1{,}7 z_i^2 - 1{,}7815 z_i^3 - 1{,}0815 \overline{z}_i^4. \qquad (7)$$

Реакция УПЭ находится по выражению, приведенному в работе [3]:

$$R_0 = (P_{0i} - P_B)\frac{dV_{0i}}{dz}. \qquad (8)$$

Давление в УПЭ с учетом перетекания воздуха в дополнительный объем [4] определяется из выражения

$$P_{0i} = P_{00}\left(\frac{V_{00}}{V_{0i}}\right)^v \left(\frac{G_{0i} - \Delta G_i}{G_{0i}}\right)^j, \qquad (9)$$

а в самом дополнительном объеме, как

$$P_\partial = P_{00}\left(\frac{G_\partial + \Delta G_i}{G_\partial}\right)^j, \qquad (10)$$

где G_{0i}, G_∂ - вес воздуха в i-ом УПЭ и дополнительной полости (ДП) в положении статического равновесия; ΔG_i - вес перетекающего воздуха из i-ого УПЭ; v и j - показатели политропы.

В работах получены значения $v = 1{,}3$; $j = 1{,}14$; при этом секундный расход найдется по выражению, представленному в работе [3]:

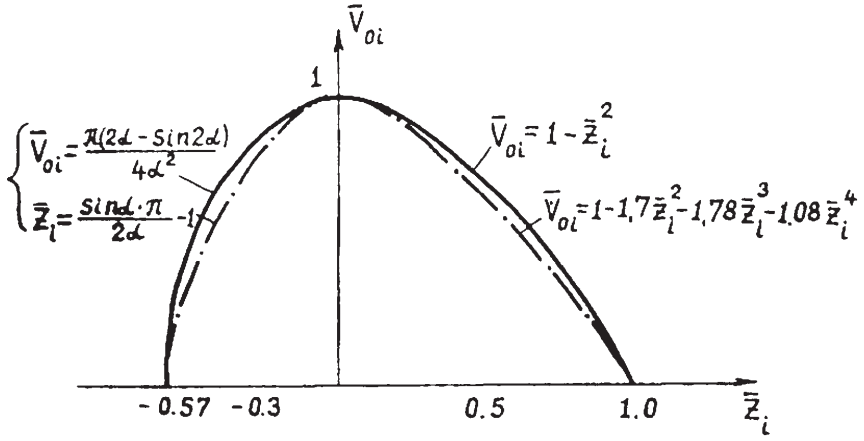


Рис. 4. Изменение площади элемента в зависимости от деформации.

$$\Delta\dot{G} = \mu f P_{oi}\left(1-Y\right)\sqrt{\frac{2g}{RT}\frac{Y}{|1-Y|}}, \qquad (11)$$

где $Y = \frac{P_{0i}}{P_\partial}$ при $\left|1-\frac{P_{0i}}{P_\partial}\right| < 0{,}5$, $Y = 0{,}5$ при $\left|1-\frac{P_{0i}}{P_\partial}\right| > 0{,}5$, а μ, f – коэффициенты расхода и площадь проходного сечения соединительного канала, R, T –газовая постоянная и температура газа.

Вес воздуха, заключенного в УПЭ и дополнительной полости (ДП), соответственно равен

$$G_{0i} = \frac{P_{00}V_{00}(1+\overline{V}_{\partial 0})}{4RT} \text{ и } G_\partial = \frac{P_{00}V_{00}\overline{V}_\partial}{RT}, \qquad (12)$$

где $\overline{V}_\partial = \frac{V_\partial}{V_{00}}$ – относительный объем ДП.

Выражение (8) с учетом (7) и (9) для i -ого УПЭ можно привести к виду

$$R_{0i} = \left[P_{00}\left(\frac{1+\overline{V}_{\partial 0}}{\overline{V}_{0i}+\overline{V}_{\partial 0}}\right)^v\left(\frac{G_{0i}-\Delta G_i}{G_{0i}}\right)^j - P_B\right]\times \qquad (13)$$

$$\times\left(3{,}4\overline{z}_i + 5{,}34\overline{z}_i^2 + 4{,}33\overline{z}_i^3\right)\frac{\pi^2 d D_c \overline{L}}{16}.$$

Здесь $\overline{V}_{\partial 0} = \frac{V_{\partial 0}}{V_{00}}$ – относительная величина объема шланга между непрерывным краном и УПЭ; D_c –диаметр средней линии контакта УПЭ с ОЗ; $\overline{L} = \frac{L}{\pi D_c}$ –относительная суммарная длина УПЭ.

На рис. 5 и 6 приведены характеристики упругой реакции УПЭ, полученные из уравнения (13) без дополнительного (рис. 5) и с подключённым объёмом (ДП) каналом большого диаметра (рис.6*)*. При этом потери в соединительном канале на предварительной стадии расчета не улетучивались.

Вид кривых показывает, что подключение ДП снижает жесткость УПЭ и тем больше, чем больше значение $\overline{V}_\partial$. Исследование с помощью функции чувствительности влияния этого параметра на жесткость C_0 УПЭ показало, что при $\overline{V}_\partial$ >10 жесткость падает незначительно и, следовательно, не имеет

смысла делать дополнительную полость больше. Возможность целенаправленного изменения параметров жесткости и энергопоглощения в УПЭ позволяет организовать один из трёх режимов работы всей системы амортизации:

1.работа системы на одной из двух возможных жесткостей, получаемых при подключении/отключении ДП к/от УПЭ;

2.работа на жесткости, промежуточной по отношению к двум возможным при максимальных потерях на перетекание воздуха за счёт подбора оптимальной величины про-

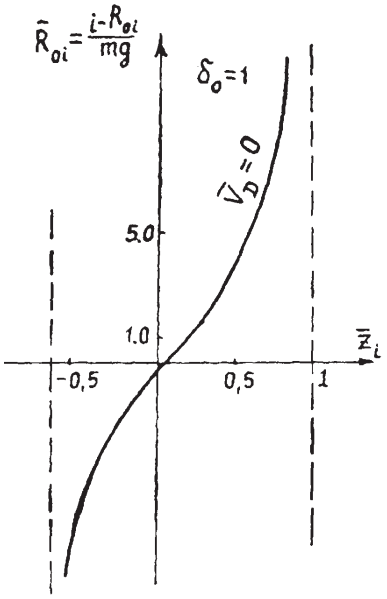


Рис. 5. Зависимость упругой реакции от деформации без дополнительного объема.

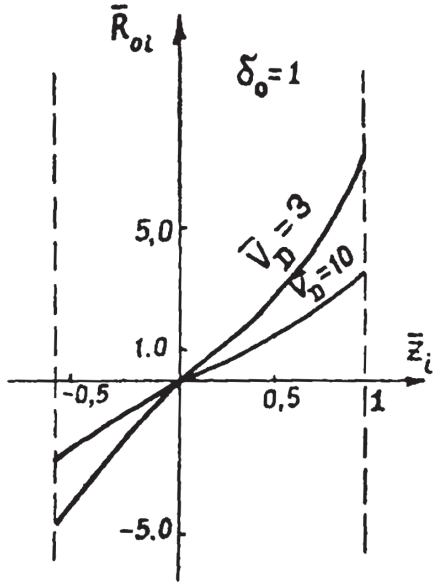


Рис. 6. Зависимость упругой реакции от деформации при подключении дополнительного объема.

ходного сечения канала между УПЭ и ДП (режим дросселирования);

3.периодическое подключение ДП по одному из возможных законов управления параметрами.

Первый из возможных режимов позволяет периодически отстраиваться от резонанса за счёт изменения собственной частоты системы амортизации, но малоэффективен при широкополосном возмущении. Второй - позволяет поглощать колебания определённой частоты (частоты собственных колебаний), но очень чувствителен к площади соединительного окна (дросселя) и амплитуде колебаний. При изменении собственной частоты системы дросселирование перестает быть эффективным. И, наконец, третий режим позволяет получать хорошие характеристики амортизации при высокочастотном периодическом подключении ДП, но он сложен в реализации. Приведенные соображения заставляют исследовать одновременно три этих режима и выбирать наилучший для конкретных случаев.

III. Несущий пневматический элемент (НПЭ), являясь основным звеном подсистемы стабилизации, должен поддерживать ОЗ в заданном положении и, тем самым, обеспечивать необходимый запас хода системы амортизации при движении основания. С целью уменьшения влияния НПЭ на жесткостные характеристики подсистемы амортизации, статическая жесткость НПЭ должна быть невысокой. При изменяющихся инерционных нагрузках подсистема стабилизации автоматически изменяет давление, а значит и массу воздуха, в каждом из НПЭ. Поэтому каждый НПЭ в процессе работы будет обладать своей жесткостью. Для того, чтобы суммарная жесткость всей системы изменялась незначительно, необходимо обеспечить малую жесткость НПЭ. Объект защиты (ОЗ) опирается на четыре НПЭ, выполненных в виде постоянно поджатых гибких, нерастяжимых шлангов большого диаметра, расположенных поперечным осям основания. При этом центры давления НПЭ №1 и №3 лежат в плоскости движения основания, четыре шланга НПЭ располагаются внутри или вблизи от шлангов НПЭ.

Направление упругой реакции НПЭ (как показано на рис. 3б) ориентировано в деформированном состоянии в направлении оси. Так как НПЭ при работе все время находится в поджатом состоянии, то на основании соотношения (4) можно записать:

$$V_{нi} = V_{00}\left\{1-\left[\frac{(d_н - d) - z_i}{d_н}\right]^2\right\}, \qquad (14)$$

где $d_н$ - диаметр НПЭ; $d_н = \frac{2B}{\pi} + d$; d - диаметр УПЭ, т.е. запас хода амортизатора в положении равновесия; B –ширина зоны контакта НПЭ в положении равновесия;

$V_{н00} = \frac{\pi d_н^2}{4} L$ –объем недеформированного НПЭ.

В окончательном виде –

$$\overline{V}_{нi} = \frac{V_{нi}}{V_{н0i}} = \frac{V_{нi}}{V_{нi}\big|_{z=0}} = \frac{1-\left[\frac{(d_н - d) - z_i}{d_н}\right]^2}{1-\left(\frac{d_н - d}{d_н}\right)^2} = 1 + b_1\overline{z}_i - b_2\overline{z}^{2_i}, \qquad (15)$$

здесь $\overline{z}_i = \frac{z_i}{d}, b_1 = \frac{4B}{4B+\pi d}, b_2 = \frac{\pi d}{4B+\pi d}$.

И наконец, используя (8), запишем выражения упругой реакции i -ого НПЭ:

$$R_{нi} = \left[P_{н0i}\left(\frac{1+\overline{V}_{дн}}{\overline{V}_{нi}+\overline{V}_{дн}}\right)^v - P_B\right] \times \left(b_1 - 2b_2\overline{z}_i\right)\frac{(4B+\pi d)\pi D_c \overline{L}}{16}, \qquad (16)$$

а $P_{н0i}$ –давление в i -ом НПЭ, необходимое для стабилизации ОЗ, принимает вид

$$P_{н0i} = \frac{mga_z}{S} + \frac{mgpa_x}{D_c S}\cos\frac{\pi}{2}(i-1) + P_{B0}. \qquad (17)$$

Здесь a_z и a_x - вертикальная и горизонтальная составляющие переносного ускорения движения основания ОЗ, в ед. «g»; $S = \pi D_c B\overline{L}$ –площадь опорной поверхности НПЭ; p - расстояние от центра поверхности крепления НПЭ к ОЗ до центра масс ОЗ; $\overline{V}_{дн} = \frac{V_{дн}}{V_{н0i}}$ –относительная величина объёма, присоединенного к НПЭ; $V_{н0i}$ –объём НПЭ в положении равновесия.

На рис. 7 показана упругая реакция НПЭ, при разных значениях $\overline{V}_{\partial н}$, в относительных единицах $\overline{R}_{нi} = \dfrac{R_{нi}}{mg}$.

IV. Статические характеристики пневматической системы амортизации. Упругая реакция i -ого элемента пневматической системы амортизации (ПСА) с учетом выражений (7), (11)-(17) будет иметь вид:

$$R_i = R_{0i} + R_{нi} = \left[P_{00} \left(\frac{1+\overline{V}_{\partial 0}}{\overline{V}_{0i} + \overline{V}_{\partial 0}} \right)^v \left(\frac{G_{0i} - \Delta G_i}{G_{0i}} \right)^j - P_B \right] \times$$
$$\times \left(3{,}4\overline{z}_i + 5{,}34\overline{z}_i^2 + 4{,}33\overline{z}_i^3 \right) \frac{\pi^2 d D_c \overline{L}}{16} +$$
$$+ \left[P_{н0i} \left(\frac{1+\overline{V}_{\partial н}}{\overline{V}_{нi} + \overline{V}_{\partial н}} \right)^v - P_B \right] \left(b_1 - 2b_2 \overline{z}_i \right) \frac{(4B + \pi d)\pi D_c \overline{L}}{16}. \quad (18)$$

Линеаризованная жесткость системы в окрестности положения равновесия может быть представлена выражением

$$C_0 = \left(\frac{\partial R_\Sigma}{\partial z} \right)_{z=0} = \left(mga_z + \pi D_c B \overline{L} P_B \right) \times$$
$$\times \left[\frac{0{,}5\pi}{B} + \frac{4Bv}{d(4B + \pi d)(1 + V_{\partial н})} \right] + \quad (19)$$
$$+ \left(0{,}35P_B - 0{,}85P_{00} \right) \pi^2 D_c \overline{L},$$

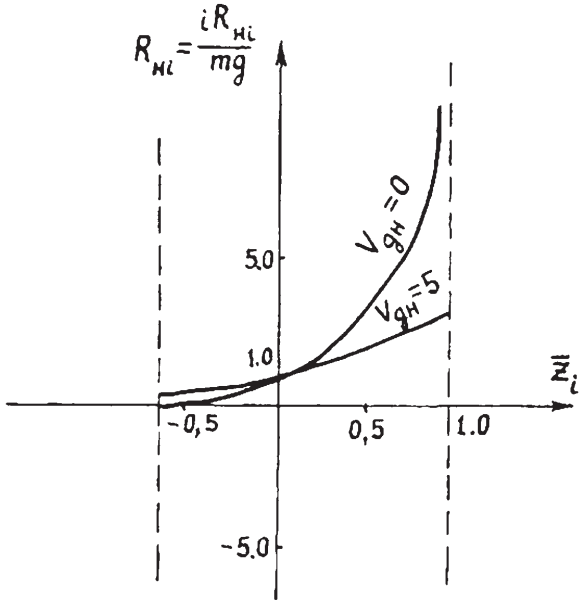


Рис. 7. Зависимость упругой реакции от деформации в несущем пневматическом элементе.

где R_Σ –суммарная реакция всех ПЭ; z - вертикальная координата центра опорной поверхности ПСА.

Изменяя давление в УПЭ, можно получать желаемые характеристики упругой реакции всей ПСА. Для получения симметричной характеристики восстанавливающей силы в окрестности малых колебаний ОЗ необходимо выполнение условия:

$$\left(\frac{\partial^2 R_\Sigma}{\partial z^2} \right)_{z=0} = 0. \quad (20)$$

Считая $P_{00} = \delta_0 P_{н00}$, где $P_{н00}$ – давление в НПЭ в состоянии покоя $(a_z = 1)$,получим:

$$\delta_0 = \frac{P_B}{P_{н00}} - \frac{b_1 v}{5\pi d\left(1 + \overline{V}_{\partial н}\right)} \left[3\pi\partial + \frac{2B(v + b_1)}{1 + \overline{V}_{\partial н}} \right]. \quad (21)$$

Для поддержания заданной частоты свободных колебаний ПСА при движении основания выберем линейный закон изменения давления в УПЭ

$$P_{00} = \left[\delta_0 + \delta_1 \left(a_z - 1 \right) \right] P_{н00}, \quad (22)$$

а коэффициент δ_1 найдем из условия:

$$\frac{\partial C_0}{\partial a_z} = 0,$$

тогда

$$\delta_1 = \frac{mg \left[\dfrac{\pi}{2B} + \dfrac{b_1 v}{d\left(1 + \overline{V}_{\partial 0}\right)} \right]}{0{,}85 P_{н00} \pi^2 D_c \overline{L}}. \quad (23)$$

V. Уравнение движения объекта защиты.

Рассмотрим ОЗ как твёрдое тело, скреплённое через ПСА с движущимся основанием (рис. 8.). ПСА включает в себя четыре тороидальных несущих и ШРУГИ-Х элемента, расположенных по поперечным осям основания. Введём на рис. 8 ряд обозначений:

Oxyz - система, связанная с основанием, с началом, лежащим в центре опорной плоскости в положении равновесия ОЗ - ось z направлена по продольной оси основания; движение основания происходит в плоскости *Oxz;*

$O_1 x_1 y_1 z_1$— система, связанная с ОЗ - ось $O_1 z_1$ направлена по оси симметрии ОЗ, а точка O_1 лежит в центре опорной плоскости ОЗ.

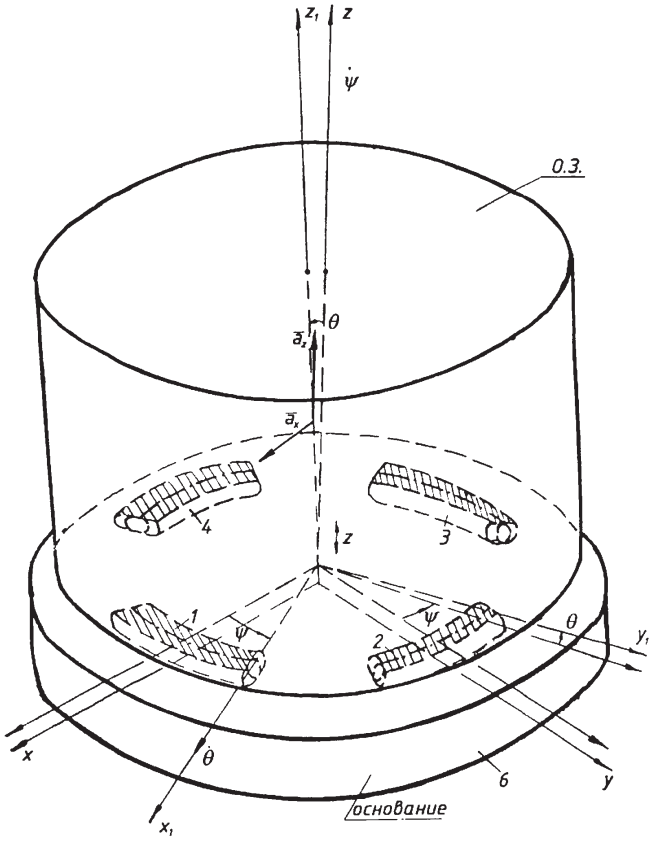


Рис. 8. Объект защиты, установленный на четырех пневматических элементах.

Движение ОЗ относительно основания определяется тремя следующими координатами:

z - смещение центра опорной поверхности 03 по вертикали относительно положения равновесия (расстояние OO_1);

ψ— угол прецессии ОЗ (угол между осями Ox и O_1x_1);

θ - угол нутации ОЗ (поворот вокруг оси O_1x_1).

Движение по остальным трём координатам будет незначительным ввиду большой жесткости ПЭ по этим направлениям, и в дальнейшем рассматриваться не будет. Для составления уравнений движения используем уравнения Лагранжа II-го рода

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{q_i}\right)-\frac{\partial T}{q_i}=Q_i\,. \qquad (24)$$

Кинетическая энергия твердого тела принимает вид

$$T=\frac{1}{2}m\left(V_{cx}^2+V_{cy}^2+V_{cz}^2\right)+ \\ +\frac{1}{2}\left(J_{cx}\omega_{x_1}^2+J_{cy}\omega_{y_1}^2+J_{cz}\omega_{z_1}^2\right), \qquad (25)$$

где V_{cx}, V_{cy}, V_{cz} – проекции скорости центра масс на систему координат, связанную с основанием; J_{cx}, J_{cy}, J_{cz} –моменты инерции твердого тела относительно главных осей; $\omega_{x_1}, \omega_{y_1}, \omega_{z_1}$ –проекции угловой скорости ОЗ на связанные с ним оси координат.

Рассмотрим малые колебания ОЗ, полагая, что $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1$:

$$V_{cz}=p\theta\dot{\psi}\cos\psi+p\dot{\theta}\sin\psi, \\ V_{cy}=p\theta\dot{\psi}\sin\psi-p\dot{\theta}\cos\psi, \qquad (26) \\ V_{cz}=\dot{z}-p\theta\dot{\theta},$$

$$\omega_{x_1}=\dot{\theta}, \\ \omega_{y_1}=\dot{\psi}\theta, \qquad (27) \\ \omega_{z_1}=\dot{\psi}.$$

Тогда кинетическая энергия ОЗ определится выражением

$$T=\frac{1}{2}m\Big[\left(p\theta\dot{\psi}\cos\psi+p\dot{\theta}\sin\psi\right)^2+$$
$$+\left(p\theta\dot{\psi}\sin\psi-p\dot{\theta}\cos\psi\right)^2++\left(\dot{z}-p\theta\dot{\theta}\right)^2\Big]+ \quad (28)$$
$$+\frac{1}{2}\left(J_{cx}\omega_{x_1}^2+J_{cy}\omega_{y_1}^2+J_{cz}\omega_{z_1}^2\right),$$

а обобщенные силы соответственно —

$$Q=\sum_{i=1}^{4}R_i-mg\left(a_z+\ddot{z}'\right),$$
$$Q_\theta=-r_c\left[\left(R_1-R_3\right)\sin\psi+\left(R_4-R_2\right)\cos\psi\right]+$$
$$+mgp\left[\theta\left(a_z+\ddot{z}'\right)-\left(a_x+\ddot{x}'\right)\sin\psi+\ddot{y}'\cos\psi\right], \quad (29)$$
$$Q_\psi=-2\theta\dot{\theta}\dot{\psi}\left(mp^2+J_{cy}\right)-$$
$$-mgp\theta\left[\left(a_x+\ddot{x}'\right)\cos\psi+\ddot{y}'\sin\psi\right],$$

где $r_c=\frac{D_c}{2}$ –расстояние от центра масс ОЗ до начала связанной системы координат ($p>0$, если центр масс лежит выше т. О по оси z_1 и наоборот).

После преобразований в соответствии с уравнением (24) получим уравнение движения $m\ddot{z}=mp\theta^2$:

$$m\ddot{z}=mp\dot{\theta}^2+\sum_{i=1}^{4}R_i-mg\left(a_z+\ddot{z}'\right)+\frac{mp\theta}{mp^2+J_{cx}}\times$$
$$\times\Big\{mp^2\theta\dot{\psi}^2+r_{cp}\left[\left(R_1-R_3\right)\sin\psi+\left(R_4-R_2\right)\cos\psi\right]+$$
$$+mgp\left[\ddot{y}'\cos\psi-\left(a_x+\ddot{x}'\right)\sin\psi\right]+p\theta\sum_{i=1}^{4}R_i\Big\},$$
$$\left(mp^2+J_{cx}\right)\ddot{\theta}=mp^2\theta\dot{\psi}^2+$$
$$+r_c\left[\left(R_1-R_3\right)\sin\psi+\left(R_4-R_2\right)\cos\psi\right]+ \quad (30)$$
$$+mgp\left[\ddot{y}'\cos\psi-\left(a_x+\ddot{x}'\right)\sin\psi\right]+p\theta\sum_{i=1}^{4}R_i,$$
$$\left[J_{cz}+\left(mp^2+J_{cx}\right)\theta^2\right]\ddot{\psi}=$$
$$=-2\theta\dot{\theta}\dot{\psi}\left(mp^2+J_{cy}\right)-$$
$$-mgp\theta\left[\left(a_x+\ddot{x}'\right)\cos\psi+\ddot{y}'\sin\psi\right].$$

Здесь R_i определяется по уравнению (12), в котором:

$$\bar{z}_i=\bar{z}-\frac{r_c\theta}{d}\left[\cos\psi\cdot\cos\frac{\pi}{2}i+\sin\psi\cdot\cos\frac{\pi}{2}(i-1)\right], \quad (31)$$

Абсолютное ускорение центра масс ОЗ:

$$\ddot{x}_c=p\left[(\theta\ddot{\psi}+2\theta\dot{\psi})\cos\psi+\left(\ddot{\theta}-\theta\dot{\psi}^2\right)\sin\psi\right]+\ddot{x}',$$
$$=p\left[\sin\psi\left(\theta\ddot{\psi}+2\dot{\theta}\dot{\psi}\right)+\cos\psi\left(\theta\dot{\psi}^2-\ddot{\theta}\right)\right]+\ddot{y}', \quad (32)$$
$$\ddot{z}_c=\ddot{z}-p\left(\dot{\theta}^2+\theta\ddot{\theta}\right)+\ddot{z}',$$
$$a_c=\sqrt{\ddot{x}_c+\ddot{y}_c+\ddot{z}_c}.$$

Максимальное смещение ОЗ относительно основания в вертикальном направлении:

$$z_{O3}=z-r_c|\theta|, \quad (33)$$

в горизонтальном — соответственно

$$x_{O3}=\sqrt{L_1^2+r_c^2}\,\sin\left(arctg\,\frac{r_c}{L_1}+|\theta|\right)-R_c, \quad (34)$$

здесь L_1 –длина ОЗ по продольной оси.

VI. Поведение объекта при действии ударного импульса ускорения.

В виду сложности и нелинейности системы уравнений (11), (18) и (30), решение их проводилось численными методами. Для расчета поведения ПСА твёрдого тела при действии ударного импульса ускорения, разработана специальная программа.

Импульс ускорения задавался в форме полуволны синусоиды, длительностью τ = 0,005 с. Рассматривалось воздействие двух типов удара:

а)вертикального (по оси z), для которого

$$\ddot{z}'=40\sin pt \text{ при } \tau\le 0{,}005c,$$
$$\ddot{z}'=0 \text{ при } \tau>0{,}005c; \quad (35)$$

б)косого (по трём осям) -

$$\ddot{z}'=40\sin pt,\ \ddot{x}'=\ddot{y}'=5\sin pt \text{ при } \tau\le 0{,}005c,$$
$$\ddot{z}'=\ddot{x}'=\ddot{y}' \text{ при } \tau>0{,}005c. \quad (36)$$

При расчёте принимались следующие значения параметров системы:

$m=2500$кг,	$D_c=2$м,
$\nu=1{,}3$,	$J_{cx}=J_{cy}=7300$ кгм^2,
$p=0{,}6$ м,	$\bar{j}=1{,}14$,
$J_{cz}=825$ кгм^2,	$\bar{L}=0{,}5$,
T = 293° K,	$\bar{V}_\partial=10$,
$L_1=5$ м,	$P_B=10^5$Н/М^2,
$\bar{V}_{\partial н}=5$	

с учетом варьирования:

$$\delta=(1\div3),\ d=(0{,}05\div0{,}15)\text{м},\ B=(0{,}05\div0{,}15)\text{ м},$$
$$f=(0\div210^{-4})\text{м}^2,\ a_x=(04\div1{,}5)g,\ a_z=(0\div5)g.$$

Кроме того моделировалось релейное управление площадью соединительных каналов f_i, находящихся между УПЭ и ДП. Качество противоударной защиты оценивалось по двум критериям:

- по максимальному значению абсолютного ускорения центра масс ОЗ, при заданном запасе хода ПСА;

- по времени затухания свободных колебаний ОЗ. Как показали расчеты по моделированию вертикального удара, максимально снизить передаваемое на ОЗ ускорение можно за счёт подключения к УПЭ большего относительного объёма ДП и увеличения диаметра УПЭ. Например, при $\overline{V}_{\partial}=10$ и $d=0{,}05$м, $a_c=\ddot{z}_{\max}=6{,}5g$, однако затухание свободных колебаний происходит медленно. Эти колебания, налагаясь на вынужденные колебания ОЗ, способны вызвать удар ОЗ об основание. Поэтому демпфирование свободных колебаний ОЗ является ОДНИМ ИЗ важнейших вопросов. Увеличение демпфирования можно обеспечить за счёт дросселирования (потерь при перетекании) воздуха в соединительном канале между УПЭ и ДП. При определённой величине отверстия $\left(f_i=10^{-4}\,м^2\right)$, свободные колебания затухают сравнительно быстро ($t_з \le 0{,}05$) при несколько худшем качестве ударозащиты $\ddot{z}_{\max}=11g$. Однако, при изменении собственной частоты системы или величины ударного импульса, дросселирование тем же сечением отверстия может не дать ожидаемого эффекта. Автоматическое отслеживание оптимального дроссельного отверстия значительно усложнит систему амортизации.

Улучшение качества противоударной защиты возможно при периодическом подключении ДП к УПЭ. При этом сечение соединительного канала должно быть достаточно большим с тем, чтобы уменьшить сопротивление перетеканию воздуха. Периодическое подключение ДП осуществляется вращением поворотного крана, например, от шагового привода с угловой скоростью:

$$\omega_{пк}=\varepsilon\omega_0, \qquad (37)$$

где $\omega_{пк}$ - угловая скорость поворотного золотника крана, ω_0 –собственная круговая частота колебаний ОЗ, ε - коэффициент параметрического возмущения.

Таким образом, ускорение на ОЗ может быть снижено на 40 %, а время переходного процесса уменьшено в 2 раза.

При релейном подключении ДП поворотным краном по сигналу о состоянии ОЗ, рассматриваемая система амортизации превращается в систему с переменной структурой (СПС). Пневматическая СПС позволяет при управлении по алгоритму

$$f_i=f_{i\,\max} \text{ при } z\dot{z}\ge 0,$$
$$f_i=0 \text{ при } z\dot{z}<0. \qquad (38)$$

Учет особенностей косого удара, когда воздействие ударного импульса ускорения реализуется по трём координатным осям, связанным с основанием, движение ОЗ происходит по трём обобщённым координатам

- вертикальные и нутационные колебания по координатам z и θ;

- прецессионное движение по координате ψ.

По результатам расчёта переходных процессов можно сделать следующие **выводы**:

1.принятая конструктивная схема ПСА позволяет сохранять почти неизменной частоту системы амортизации при значительном изменении ускорения основания (a_x - (0÷1,5)g, a_z = (0÷5)g); без расчленения ПСА на две независимые подсистемы, собственная частота изменялась бы в 2÷2,5 раза;

2.максимальное снижение передаваемого на ОЗ ударного ускорения (8÷10 раз), происходит при небольших значениях давления в УПЭ$(\delta=1)$;

3.с увеличением присоединённого объёма НПЭ ($\overline{V}_{\partial}$), жесткость ПСА значительно снижается (до величин меньших 4 Гц);

4.при оптимальной величине дроссельного отверстия, свободные колебания ОЗ будут подавляться быстрее при меньших значениях давления в УПЭ (δ);

5.качество переходного процесса улучшается при управлении соединительным каналом по алгоритму (21).

VII. Амплитудно-частотные характеристики амортизированного объекта защиты.

Предполагается что поведение ОЗ будет определяться гармоническим воздействием в диапазоне частот 1÷100 Гц. При высокочастотном воздействии (f_B > 100 Гц) рассматриваемая ПСА, как и любая пневматическая система, обладает хорошими виброизолирующими свойствами (коэффициент передачи ускорения k_y < 0,1). Поэтому особый интерес представляет реакция системы в области основного, субгармонических и супергармонических резонансов. На рис. 9 приведены графики из-

менения передачи ускорения $k_y = \frac{\ddot{z}_c}{\ddot{z}'}$ в функции частоты возмущения. Возмущение ускорения задавалось в виде $\ddot{z}' = 10 \sin 2\pi f_B t$.

При этом основной резонанс лежит в области $f_B = 8$ Гц; $k_{y\,max} = 12$. Эффективная виброзащита осуществляется в области $f_B > 18$ Гц. При дросселировании наблюдается основной резонанс на частоте $f_B = 5$ Гц. Суб- и супергармонические резонансы имеют размытую форму.

Таким образом, управление площадью сечения канала по данному алгоритму позволяет существенно уменьшить резонансные колебания 03 при сохранении хороших виброизолирующих характеристик в зарезонансной зоне.

VIII. Модельный расчёт конструктивных параметров системы.

Если провести численный расчёт конструктивных параметров по приведенным уравнениям, то результаты расчёта статических, АЧХ и характеристик в переходных режимах, с учетом конструктивных ограничений, могут быть представлены в табл. 1.

При больших значениях параметров d и B габариты ПСА существенно увеличатся при незначительном улучшении виброизолирующих свойств системы (табл. 2).

По результатам приведённых исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации.

1.Пневматическая система амортизации рассматриваемой конструкции позволяет эффективно снижать кратковременные и стационарные вибрационные нагрузки, передаваемые на объект защиты (ОЗ) в продольном направлении.

2.Исследования реакции на ударное воздействие, показывает, что пик абсолютного ускорения появляется через несколько периодов свободных колебаний после действия удара. Поэтому должна быть поставлена задача максимально быстрого гашения свободных колебаний за счёт управления параметрами ПСА, например, периодическим подключением к УПЭ дополнительной полости или подбором оптимальных сечений соединительных каналов. Необходимо также увеличить, при сохранении той же жесткости, энергорассеивающие характеристики элементов крепления тел 3 и 4 и конструкции тела 2 за счёт введения конструкционного демпфирования и энергопоглащающих покрытий.

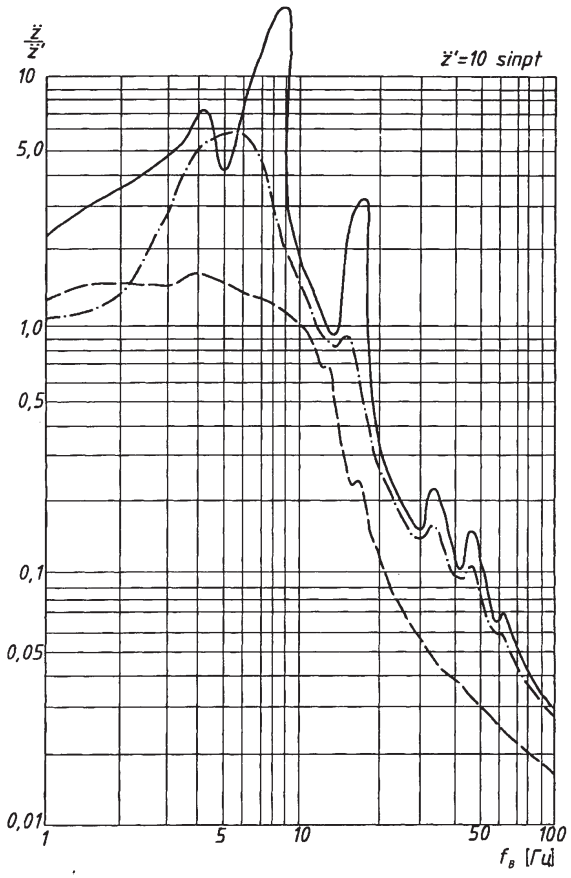


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики модельного объекта защиты.

3.Максимально увеличить эффективность ПСА можно, снизив собственную частоту системы до значения 4÷5 Гц, при этом в зарезонансной области ПСА ведёт себя как обычная пассивная виброзащитная система. Резонансные колебания можно подавить за счёт периодического подключения дополнительной полости по предлагаемому алгоритму. Уменьшить собственную частоту системы можно, увеличив диаметр УПЭ или площадь опорной поверхности НПЭ, а также подсоединяя к УПЭ больший дополнительный объём.

4.Постоянная составляющая ускорения основания при данной схеме ПСА не вызывает изменения собственной частоты системы, а следовательно, и не влияет на эффективность амортизации.

5.Разработанная программа расчёта динамических характеристик много массового объекта "PSPAMO" позволяет проводить численное моделирование поведения объекта с пневматической системой амортизации при различных видах возмущающих нагрузок.

Табл. 1.

Результаты модельного расчета параметров состояния ОЗ на пневмоэлементах.

Диаметр УПЭ, запас хода ПСА			d =0,1 м		
Ширина зоны контакта НПЭ			B = 0,1 м		
Диаметр средней линии ПСА			D_c = 2,0 м		
Суммарная длина пневмоэлементов			L = 3,14м		
Объём НПЭ			$V_{н0}$ = 0,056 м^3		
Объём УПЭ			V_{00} = 0,0246 м^3		
Начальное давление в пневмоболоне			$P_{б0}$ = 21 МПа		
Подсистема стабилизации					
Параметр	a_z		$V_{дн}$		
	1	5	0	3	5
$P_{н0}$, Н/м^2	163000	482000			
$V_{нп}$, м^3			0	0,168	0,28
Объём болона $V_б$ м^3			0,00218	0,0087	0,013
Диаметр болона $D_б$, м			0,16	0,256	0,292

Табл. 2.

Результаты расчета при увеличенных d и B.

Подсистема амортизации					
Параметр	δ_0			$\bar{V}_д$	
	1	3	5	3	5
P_{00}, Н/м^2	163700	291000	482000		
Объём ДП $V_д$ м^3				0,074	0,123
Диаметр $D_б$, м				0,52	0,62

Для оценки эффективности работы ПСА дополнительно проводится аналогичный расчёт неамортизированного ОЗ. Программа позволяет оптимизировать пара
метры системы по различным, заранее выбранным, критериям, а также проводить исследования законов управления этими параметрами.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Хоменко А.П. Динамика и управление в задачах виброзащиты и виброизоляции подвижных объектов. Издательство Иркутского гос. университета. Иркутск. 2000. 296 с.
2. Eliseev S.V., Lukyanov A.v., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. Dynamics of mechanical systems with additional ties // Publishing of Irkutsk stateuniversity. Irkutsk, 2006. 316p.
3. Лукьянов А.В. Иследование пневматического амортизатора с воздушным демпфированием // Управляемые механические системы. -Иркутск. 1984. С.59-68.

Белокобыльский С.В., Ситов И.С. УДК 665.01

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВИБРАЦИОННОГО ПОЛЯ ДВУМЕРНОГО ОБЪЕКТА В СИСТЕМЕ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ «СМЕЩЕНИЕ – УГОЛ ПОВОРОТА» И СООТВЕТСТВУЮЩИХ КООРДИНАТАМ ОБОБЩЕННЫХ СИЛАХ

Рассматриваемый случай относится к режиму возникновения вибрационного поля при учете комплексного характера силового возмущения. Последнее может создаваться действием инерционных сил, связанных с неуравновешенностью элементов вращения в приводах рабочих органов и динамической разбалансировкой. Определенный вклад в формирование силового возмущения в системе привносится также нестабильностью параметров контактного взаимодействия между диском рабочего органа и обрабатываемой бетонной поверхностью при ее заглаживаниих [1].

Расчетная схема такой системы имеет вид, как показано на рис. 1.

На приведенной расчетной схеме принят ряд обозначений:

I, m - соответственно момент инерции и масса рабочего блока ($I = m\rho^2, a\rho$ –радиус инерции); k_1, k_2 - приведенные к точкам (1) и (2) упругости рабочего блока; P, M — сила и момент сил, приложенные в центре масс O; L_1, L_2 - геометрические параметры; x, o, y - система декартовых координат, в которой рассматривается движение центра масс.

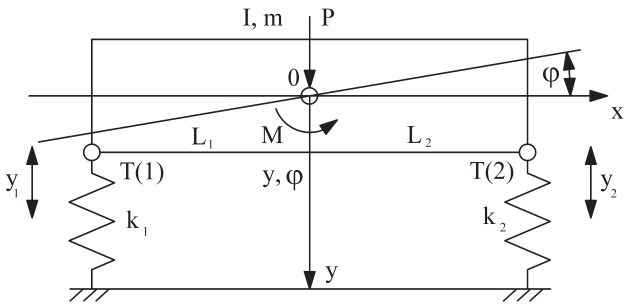


Рис.1. Расчетная схема рабочего блока в системе обобщенных координат y, φ.

Полагая, что P и M являются гармоническими функциями с одной частотой, запишем, используя уравнение Лагранжа 2 рода, систему дифференциальный уравнений для расчетной схемы на рис. 1 в виде

$$\begin{aligned} &m\ddot{y} + (k_1 + k_2)y + (k_1 L_1 - k_2 L_2)\varphi = P, \\ &I\ddot{\varphi} + (k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2)\varphi + (k_1 L_1 - k_2 L_2)y = M. \end{aligned} \quad (1)$$

Соответствующая уравнениям (1) структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления (САУ) представлена на рис. 2.

Поскольку особенности системы определяются условиями, создаваемыми внешними действующими факторами [2] найдем систему соответствующих передаточных функций

$$\overline{W_1} = \frac{\overline{y}}{\overline{p}\,(при\ \overline{M} = 0)} = \frac{I_p^2 + (k_1 L_1^2 + k_2 L_2)^2}{A}, \quad (2)$$

$$\overline{W_2} = \frac{\overline{\varphi}}{\overline{p}\,(при\ \overline{M} = 0)} = -\frac{k_1 L_1 - k_2 L_2}{A}, \quad (3)$$

где $A = \left(mp^2 + k_1 + k_2\right)\left(Ip^2 + k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2\right) - \left(k_1 L_1 - k_2 L_2\right)^2$ – частотное уравнение системы, представленной на рис. 2; в свою очередь-

$$\overline{W_1}' = \frac{\overline{y}}{\overline{M}\,(при\ \overline{p} = 0)} = -\frac{k_1 L_1 - k_2 L_2}{A}, \quad (4)$$

$$\overline{W_2}' = \frac{\overline{\varphi}}{\overline{M}\,(при\ \overline{p} = 0)} = -\frac{mp^2 + k_1 + k_2}{A}. \quad (5)$$

Используя (2) ÷ (5), найдем, что

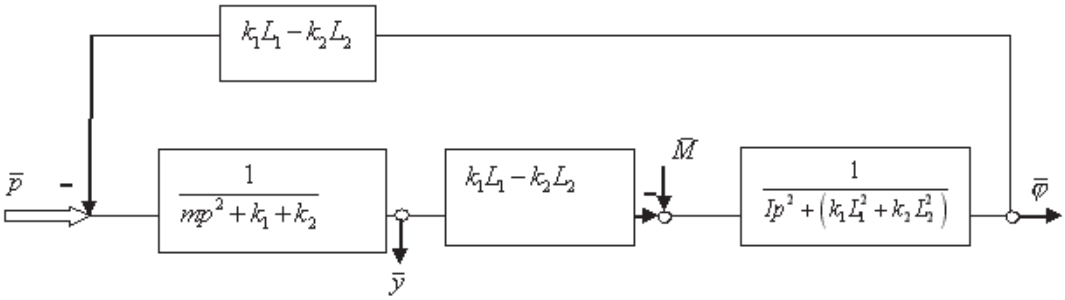


Рис.2. Структурная схема системы эквивалентной в динамическом отношении расчетной схеме на рис. 1.

$$\bar{y} = \overline{W}_1\bar{p} - W_1'\overline{M} = \frac{Ip^2 + (k_1L_1^2 + k_2L_2^2)}{A}\cdot\bar{p} - \frac{k_1L_1 - k_2L_2}{A}\cdot\overline{M}, \quad (6)$$

$$\bar{\varphi} = W_2\bar{p} - W_2'\overline{M} = -\frac{k_1L_1 - k_2L_2}{A}\cdot\bar{p} + \frac{mp^2 + k_1 + k_2}{A}\cdot\overline{M}, \quad (7)$$

откуда можно получить

$$\overline{W} = \frac{\bar{y}}{\bar{\varphi}} = \frac{p(Ip^2 + k_1L_1^2 + k_2L_2^2) - M(k_1L_1 - k_2L_2)}{(mp^2 + k_1 + k_2)\overline{M} - \bar{p}(k_1L_1 - k_2L_2)} \quad (8)$$

или

$$\overline{W} = \frac{(Ip^2 + k_1L_1^2 + k_2L_2^2) - \frac{\overline{M}}{\bar{p}}(k_1L_1 - k_2L_2)}{-(k_1L_1 - k_2L_2) + \frac{\overline{M}}{\bar{p}}(mp^2 + k_1 + k_2)}. \quad (9)$$

Поскольку в принятой нами схеме внешнего воздействия $P = H_i \sin wt, a M = H_2 \sin wt$, то при $h_i = {}^{H_i}\!/_m, h_2 = {}^{H_2}\!/_I$ выражение (8) может быть записано в виде:

$$W = \frac{\frac{\bar{p}}{mI}\cdot I(p^2 + \frac{k_1L_1^2 + k_2L_2^2}{I}) - \frac{\overline{M}}{mI}(k_1L_1 - k_2L_2)}{\frac{\overline{M}}{mI}m(p^2 + \frac{k_1 + k_2}{m}) - \frac{\bar{p}}{MI}(k_1L_1 - k_2L_2)} = \frac{\frac{H_1}{m}(p^2 + w_3^2)\frac{-H_2}{I}w_2}{\frac{H_2}{I}\left(p^2 + w_3^2\right) - \frac{H_1}{m}w_4} = \frac{h_1(p^2 + w_3^2) - h_2w_2}{h_2\left(p^2 + w_1^2\right) - h_1w_4}. \quad (10)$$

Здесь

$$w_1^2 = \frac{k_1 + k_2}{m}, w_2 = \frac{k_1L_1 - k_2L_2}{m}, w_3^2 = \frac{k_1L_1^2 + k_2L_2^2}{I}, w_4 = \frac{w_2}{\rho^2}.$$

Пусть в какой-то момент времени твердое тело занимает положение, изображенное на рис.3.

Точку пересечения вспомогательной оси с осью обозначим через Δx. Фиксируя определенные моменты времени, получим совокупность точек , откладывая которые вдоль линии, получим так называемую линию узлов [3]. Условием однородности вибрационного поля становится в этом случае перемещение точки в бесконечность. Таким образом, чем дальше удалена точка от начала координат, тем более однородным будет вибрационное поле взаимодействия рабочего блока с бетонной поверхностью. В физическом смысле — однородность связана с тем, что все точки колеблющегося твердого тела должны иметь одно направление движения, хотя и разные амплитуды. Если точки твердого тела, точнее, группы точек двигаются в разных направлениях, то существует узел колебаний, в котором амплитуда колебаний точки равна нулю. В целом, при такой организации взаимодействия диска рабочего органа с поверхностью бетонной смеси не обеспечивается равномерность распределения усилий по длине контакта и требуемое качество поверхности. Поскольку при одной и той же направленности колебаний движения точек (софазности) амплитуды отдельных точек будут разными, то в качестве оценочной характеристики или контролируемого параметра, связанного с качеством технологического процесса виброзаглаживания, целесообразно использовать процедуры усреднения амплитуд по длине контакта

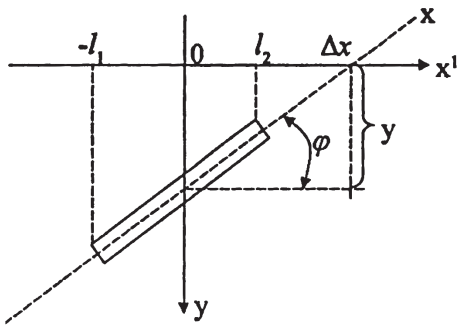


Рис.3. Определение линии узлов колебаний.

(т.е. использовать интегральную оценку). Согласно рис.3 можно получить

$$\Delta x = \frac{y}{tg\varphi},$$

что при малых углах φ дает

$$\Delta x = \frac{y}{\varphi} \qquad (11)$$

или с использованием (10) после подстановки $p = jw$, получим

$$\Delta x = \frac{h_1(w_3^2 - w^2) - w_2 h_2}{h_2(w_1^2 - w^2) - w_4 h_1}. \qquad (12)$$

Таким образом, Δx можно рассматривать как функцию параметров , которые, в свою очередь, связаны с максимальными амплитудами силовых факторов H_1 и H_2, величинами момента инерции и массы тела I и m. Величина и знак Δx , как это следует из (12), зависят от частоты внешнего воздействия , что создает необходимые предпосылки для выбора конструктивных параметров рабочего блока и рабочих органов, а также позволяет определиться с параметрами вибрационного технологического процесса.

Выражение (12) позволяет исследовать влияние каждого из упомянутых факторов или их комбинации. Если рассматривать Δx как функцию одного параметра (другие считать постоянными), то можно получить следующие зависимости:

$$\text{I.}\Delta x = f(h_1) = \frac{ah_1 + b}{ck_1 + d}, \qquad (13)$$

$$\text{II.}\Delta x = f(h_2) = \frac{ah_2 + b}{ch_2 + d}, \qquad (14)$$

$$\text{III.}\Delta x = f(k_1) = \frac{ak_1 + b}{ck_1 + d}, \qquad (15)$$

$$\text{IV.}\Delta x = f(k_2) = \frac{ak_2 + b}{ck_2 + d}, \qquad (16)$$

$$\text{V.}\Delta x = f(m) = \frac{am + b}{cm + d}, \qquad (17)$$

$$\text{VI.}\Delta x = f(w) = \frac{aw^2 + b}{cw^2 + d}, \qquad (18)$$

$$\text{VII. }\Delta x = f(p) = \frac{ap^2 + b}{cp^2 + d}. \qquad (19)$$

Значения коэффициентов выражений (13) ÷ (19) представлены в таблице 1. Из анализа приведенных выражений можно выделить две группы:

1. Δx является функцией параметра и имеет вид

$$\Delta x = \frac{az + b}{cz + c}; \qquad (20)$$

2. Δx является функцией параметров ρ^2, w^2 и имеет вид

$$\Delta x = \frac{az^2 + b}{cz^2 + b}. \qquad (21)$$

Физический смысл заключается в том, что они являются значениями частот собственных колебаний соответствующих парциальных систем, на рис. 2, а W_3 характеризует степень связности движений между парциальными системами через так называемые упругие перекрестные связи; w является частотой возмущающей силы. Из анализа зависимостей (13)÷(19) можно заключить, что:

1.существует значение параметра в некотором параметрическом пространстве — точка, в окрестностях которой малые изменения параметра могут привести к большим изменениям Δx;

2.можно найти интервалы, в которых большие изменения параметра приводят к малым изменениям функции Δx;

3.при больших значениях параметра величина функции ограничена сверху или снизу.

Рассмотрим условия, при которых узел колебаний находится вне рабочего органа. Если обратиться к схеме (рис. 3), то

$$y > 0\, u \begin{cases} \Delta x > l_2 \ при\, \varphi > 0, \\ \Delta x < -l_1\, при\, \varphi < 0 \end{cases} \qquad (22)$$

или

$$y < 0\, u \begin{cases} \Delta x > l_2 \ при\, \varphi > 0, \\ \Delta x < -l_1\, при\, \varphi < 0. \end{cases} \qquad (23)$$

Это означает, что узел колебаний находится вне рабочего органа. Так как параметры системы фиксированы, то можно рассматривать только одно условие $y > 0$ или . Пусть, например, выполняется условие $y > 0$. Так как $\Delta x = \bar{y} \,/\, \bar{\varphi}$, то

$$\varphi < \frac{y}{l_2}, rge\, \varphi > 0, \qquad (24)$$

$$\varphi < \frac{y}{-l_1}, rge\, \varphi < 0. \qquad (25)$$

Подставляя (6) в (25), получим, в конечном итоге, систему неравенств

Табл. 1.

Значения коэффициентов выражений (13) ÷ (19).

№ п/п	Вид функций Δx	Значения коэффициентов			
		a	b	c	d
1	$\frac{ah_1+b}{ch_1+d}$	$\frac{k_1L_1^2+k_2L_2^2}{I}-w^2$	$-h_2\frac{(k_1L_1-k_2L_2)}{m}$	$-\frac{(k_1L_1-k_2L_2)}{\rho^2 m}$	$h_2(\frac{k_1+k_2}{m}-w^2)$
2	$\frac{ah_2+b}{ch_2+d}$	$-\frac{k_1L_1-k_2L_2}{m}$	$h_1(\frac{k_1L_1^2+k_2L_2^2}{I}-w^2)$	$\frac{k_1+k_2}{m}-w^2$	$-h_1\cdot\frac{k_1L_1-k_2L_2}{m\rho^2}$
3	$\frac{ak_1+b}{ck_1+d}$	$\frac{L_2}{m}(\frac{h_1L_2}{\rho^2}+h_2)$	$\frac{k_2L_2}{m}(\frac{h_1L_2}{\rho^2}+h_2)-h_1w^2$	$\frac{1}{m}\left(h_2+\frac{h_1L_1}{p^2}\right)$	$\frac{k_2}{m}(\frac{h_1L_2}{\rho^2}+h_2)-h_2w^2$
4	$\frac{ak_2+b}{ck_2+b}$	$\frac{L_2}{m}(\frac{h_1L_2}{\rho^2}+h_2)$	$\frac{k_1L_1}{m}(\frac{h_1L_1}{\rho^2}+h_2)-h_1w^2$	$\frac{1}{m}(h_2-\frac{h_1L_1}{\rho^2})$	$\frac{k_1}{m}(h_2-\frac{h_1L_1}{\rho^2})-h_2w^2$
5	$\frac{am+b}{cm+b}$	$H_1\rho^2w^2$	$H_2(k_1L_1-k_2L_2)-H_1(k_1L_1^2+k_2L_2^2)$	H_2w^2	$H_1(k_1L_1-k_2L_2)-$ $-H_2(k_1+k_2)$
6	$\frac{aw^2+b}{cw^2+d}$	h_1	$h_2\frac{k_1L_1-k_2L_2}{m}-h_1\frac{k_1L_1^2\pm k_2L_2^2}{I}$	h_2	$h_1\cdot\frac{k_1L_1-k_2L_2}{m\rho^2}-$ $-h_2\frac{k_1\pm k_2}{m}$
7	$\frac{a\rho^2+b}{c\rho^2+d}$	H_1mw^2	$H_2(k_1L_1-k_2L_2)-H_1(k_1L_1^2+k_2L_2^2)$	0	$H_1(k_1L_1-k_2L_2)-$ $-H_2(k_1+k_2)+H_2mw^2$

$$h_2(w_1^2-w^2)-w_4h_1 < \\ <\frac{1}{L_2}\left[h_1\left(w_3^2-w^2\right)-w_2h_2\right], \\ h_2(w_1^2-w^2)-w_4h_1 > \\ >-\frac{1}{L_1}\left[h_1\left(w_3^2-w^2\right)-w_2h_2\right]. \quad (26)$$

Для определения того, находится узел колебаний за пределами рабочего блока или нет, необходимо рассмотреть одновременно зависимость Δx от выбранного параметра и условия (26). Пусть, к примеру, $\Delta x = f(w)$, тогда с учетом (19) и того, что $a>0, c>0$ (табл. 1) неравенства (26) можно переписать в виде

$$w^2(-a+cL_2)<-dL_2+b, \\ w^2(-a-cL_1)<dL_1+b. \quad (27)$$

В системе координат $\Delta x, w$ при различных сочетаниях коэффициентов a,b,c,d, могут быть получены графики зависимостей , которые приведены на рис. 4 — варианты (1) ÷ (6).

Рассмотрим упомянутые варианты (Рис. 4), привлекая условия (27).

1.Отметим, что для вариантов соотношений между коэффициентами, изображенных на рис. 4: (1), (2) и (6) — случай β, условия не выполняются по определению (см. табл. 1), поэтому узел колебаний при таком выборе параметров находится в пределах твердого тела.

2.Для случая, соответствующего графику Рис. 4-(3) с учетом (27), можно получить, если $L_2<\frac{a}{c}$ и $-l_1<\frac{b}{d}$, что узел колебаний находится вне твердого тела при $w^2<-b/a$ или

$$w^2<\frac{k_1}{\frac{h_1}{I}\left(k_1L_1^2+k_2L_2^2\right)-\frac{h_2}{m}\left(k_1L_1-k_2L_2\right)}. \quad (28)$$

При других соотношениях параметров узел колебаний находится в пределах твердого тела.

3.Для варианта соотношения, изображенного на рис. 4-(4) с учетом (27) при $L_2<\frac{b}{d}$, узел колебаний может находиться вне твердого тела при $w^2>-\frac{b}{a}$ (см. выражение (28)), а при $w^2\to-\frac{b}{a}$, $\Delta x\to\infty$.

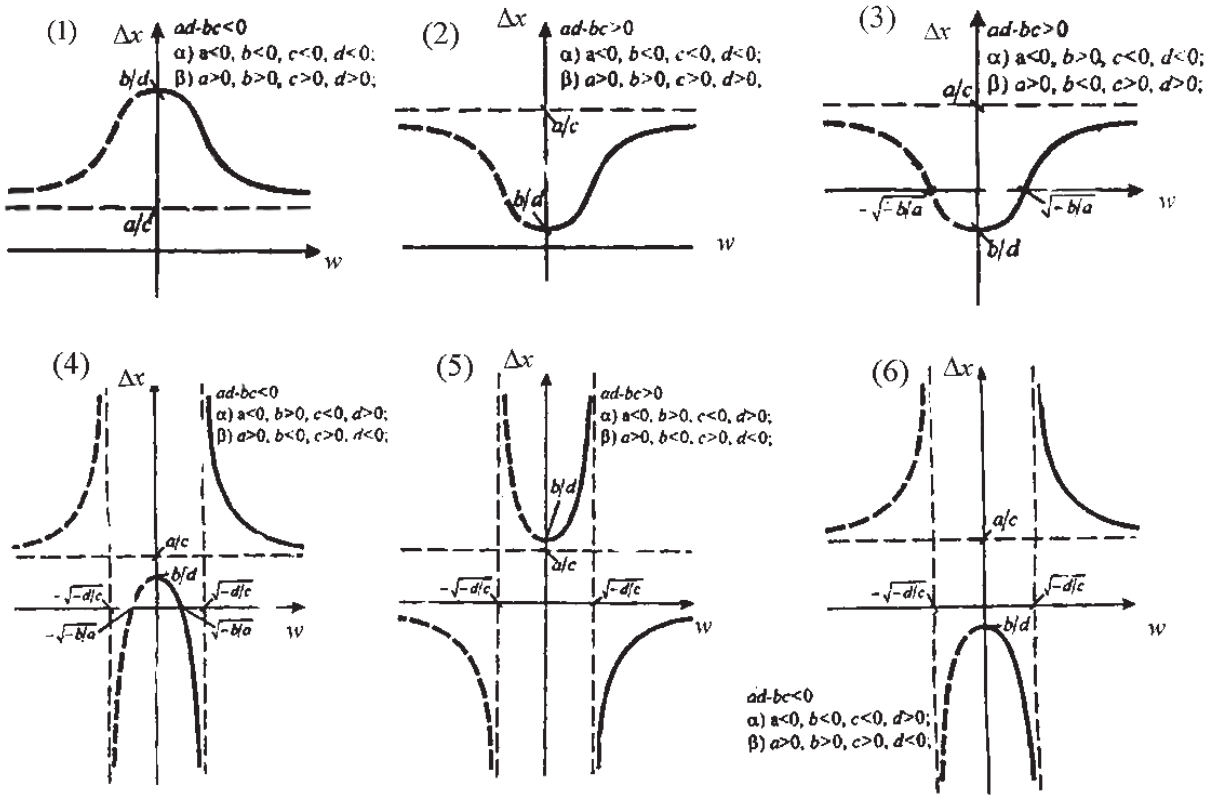


Рис.4. Возможные формы зависимости при различных сочетаниях значений коэффициентов a,b,c,d в выражении (19); сочетания параметров для случаев (1) (6) указаны в двух вариантах α и β.

Во всех остальных случаях узел колебаний находится в пределах твердого тела.

4. Для варианта, изображенного на рис. 4-(5) с учетом (27) и условиях $\frac{b}{d} < l_2 < \frac{a}{c}$, узел колебаний находится вне твердого тела при $w^2 > -b/a$, $\Delta x \to \infty$ при $w^2 > -\frac{b}{a}$.

При других соотношениях параметров узел колебаний находится в пределах твердого тела. Аналогичным образом может быть изучено влияние конструктивных параметров m, p, k_1, k_2, параметров внешнего воздействия k_1, k_2 при фиксированной частоте внешнего воздействия.

Таким образом, структура вибрационного поля рабочего органа виброзаглаживающей технологической машины, расчетная схема которой приведена на рис. 1, при схеме нагружения внешними воздействиями в системе координату, φ, зависит от выбора значений конструктивных параметров.

Для рационального выбора и оценки варианта конструктивного решения можно при фиксированной частоте внешних воздействий выбором жесткостей и массоинерционных параметров узел колебаний вывести за пределы рабочего блока. Аналогично, представляется возможным при соответствующем наборе конструктивных параметров определить требования к частотному спектру рабочего органа, при котором узел колебаний выйдет за предел рабочего блока.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Ситов И.С., Белокобыльский С.В. Способы и средства изменения динамического состояния технологического комплекса для вибрационного заглаживания // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Вып. 1 (13). ИрГУПС. Иркутск. 2007. С. 46-52.
2. Белокобыльский С.В., Ситов И.С. Приведенные жесткости двумерных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Вып. 4 (16). ИрГУПС. Иркутск. 2007. С. 6-10.
3. Гозбенко В.Е. Управление динамическими свойствами механических колебательных систем. Издательство Иркутского государственного университета. Иркутск. 2000. 412 с.

Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. УДК 665.01

РЫЧАЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ В СИСТЕМАХ БАЛОЧНОГО ТИПА

Введение рычажных механизмов для изменения динамических свойств колебательных механических систем различной степени сложности рассматривалось в работах [1,2,3] и др., что позволяет сделать ряд выводов о возможных новых эффектах. Одним из таковых усматривается в структурных изменениях, связанных с так называемой идеей «разнесения точек» соединения элементов в последовательных и параллельных схемах, а также формировании приведенных массо-инерционных, демпфирующих и упругих параметров системы [4,5,6].

Вместе с тем, рычажные соединения могут быть использованы для получения и других эффектов, характерных, например для замкнутых механических систем [2] или специальных технических устройств [3].

В качестве базовой схемы может быть рассмотрена система, представленная на рис.1.

Выражения для кинетической и потенциальной энергии системы определяются по обычной методике [4] и имеют вид

$$T = \frac{1}{2}M\dot{y}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\varphi}_2^2, \qquad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1(y_1 - \varphi_1 l_1)^2 + \frac{1}{2}k_0(\varphi_1 l_2 - \varphi_2 l_3)^2 + \frac{1}{2}k_2(y_2 - \varphi_2 l_4)^2, \qquad (2)$$

где принят ряд обозначений:

$y = \dfrac{y_1 L_2 + y_2 L_1}{L_1 + L_2}$; $\varphi = \dfrac{y_1 + y_2}{L_1 + L_2}$; $y_1^{/} = l_1\varphi_1$; $y_1^{//} = l_2\varphi_1$; $y_2^{/} = l_4\varphi_2$; $y_2^{//} = l_3\varphi_2$; L_1, L_2 - расстояние до центра масс твердого тела; l_1, l_2, l_3, l_4 - плечи рычагов; J_1, J_2 - моменты инерции рычагов; M и J - соответственно масса и момент инерции твердого тела; k_1, k_2, k_3 - жесткости упругих элементов.

Дифференциальные уравнения движения для системы, приведенной на рис.1, имеют вид (при отсутствии внешних воздействий):

$$\ddot{y}_1\frac{ML_2^2 + J}{(L_1 + L_2)^2} + \ddot{y}_2\frac{ML_1L_2 - J}{(L_1 + L_2)^2} + k_1 y_1 - k_1\varphi_1 l_1 = 0, \qquad (3)$$

$$\ddot{y}_2\frac{ML_1^2 + J}{(L_1 + L_2)^2} + \ddot{y}_1\frac{ML_1L_2 - J}{(L_1 + L_2)^2} + k_2 y_2 - k_2\varphi_2 l_4 = 0,$$

$$J_1\ddot{\varphi}_1 + k_1\varphi_1 l_1^2 - k_1 y_1 l_1 + k_0 l_2^2\varphi_1 - k_0 l_2 l_3\varphi_2 = 0,$$
$$J_2\ddot{\varphi}_2 + k_2\varphi_2 l_4^2 - k_2 y_2 l_4 + k_0 l_3^2\varphi_2 - k_0 l_2 l_3\varphi_1 = 0.$$

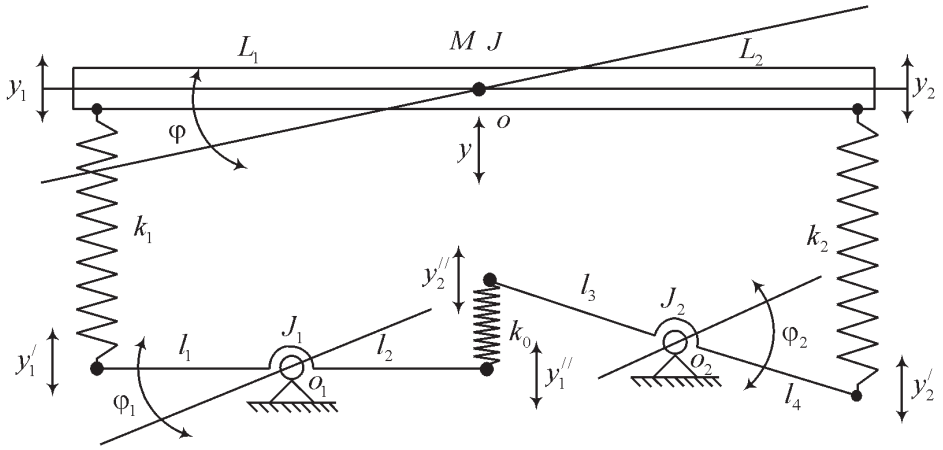


Рис.1. Расчетная схема упругого подвеса с двумя рычажными механизмами.

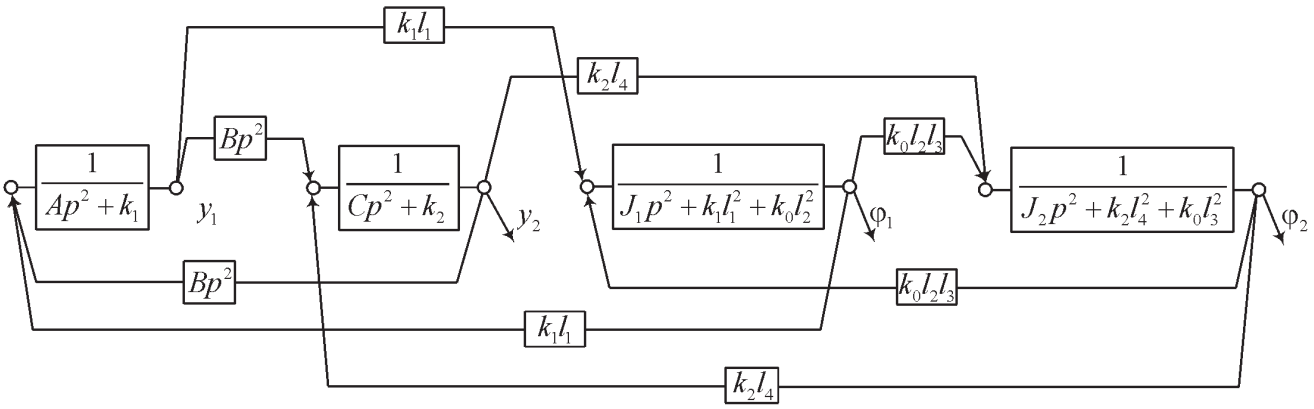


Рис.2. Структурная схема эквивалентной в динамическом отношении САУ, соответствующая рис.1, где приняты обозначения: $A=\frac{ML_2^2+J}{(L_1+L_2)^2}$; $B=\frac{ML_1L_2-J}{(L_1+L_2)^2}$; $C=\frac{ML_1^2+J}{(L_1+L_2)^2}$.

Структурная схема, соответствующая системе (3), приведена на рис.2.

Так как в системе на рис.2 существует непланарная связь, то уравнения (3) лучше привести к унифицированной форме, используя метод определителей [1]:

$$\begin{aligned} a_{11}y_1+a_{12}y_2+a_{13}y_3+a_{14}y_4&=0,\\ a_{21}y_1+a_{22}y_2+a_{23}y_3+a_{24}y_4&=0,\\ a_{31}y_1+a_{32}y_2+a_{33}y_3+a_{34}y_4&=0,\\ a_{41}y_1+a_{42}y_2+a_{43}y_3+a_{44}y_4&=0, \end{aligned} \tag{4}$$

где $a_{11}=Ap^2+k_1$, $a_{12}=Bp^2$, $a_{13}=-k_1l_1$, $a_{14}=0$, $a_{21}=Bp^2$, $a_{22}=Cp^2+k_2$, $a_{23}=0$, $a_{24}=-k_2l_4$, $a_{31}=-k_1l_1$, $a_{32}=0$, $a_{33}=J_1p^2+k_1l_1^2+k_0l_2^2$, $a_{34}=-k_0l_2l_3$, $a_{41}=0$, $a_{42}=-k_2l_4$, $a_{43}=-k_0l_2l_3$, $a_{44}=J_2p^2+k_2l_4^2+k_0l_3^2$, $y_3=\varphi_1$, $y_4=\varphi_2$.

Тогда можно записать:

$$\Delta=a_{11}\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24}\\ a_{32} & a_{33} & a_{34}\\ a_{42} & a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}-a_{21}\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14}\\ a_{32} & a_{33} & a_{34}\\ a_{42} & a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}+ +a_{31}\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14}\\ a_{22} & a_{23} & a_{24}\\ a_{42} & a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}-a_{41}\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14}\\ a_{22} & a_{23} & a_{24}\\ a_{32} & a_{33} & a_{34}\end{vmatrix}, \tag{4}$$

где Δ - соответствует частотному уравнению системы, приведенной на рис.2.

Представим определитель четвертого порядка в виде

$$\Delta=a_{11}\Delta_1-a_{21}\Delta_2+a_{31}\Delta_3-a_{41}\Delta_4, \tag{5}$$

и раскроем Δ_i $(i=\overline{1,4})$, используя миноры

$$\Delta_1=\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24}\\ a_{32} & a_{33} & a_{34}\\ a_{42} & a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}=a_{22}\begin{vmatrix} a_{33} & a_{34}\\ a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}- -a_{32}\begin{vmatrix} a_{23} & a_{24}\\ a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}+a_{42}\begin{vmatrix} a_{23} & a_{24}\\ a_{33} & a_{34}\end{vmatrix}, \tag{6}$$

$$\Delta_2=\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14}\\ a_{32} & a_{33} & a_{34}\\ a_{42} & a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}=a_{12}\begin{vmatrix} a_{33} & a_{34}\\ a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}- -a_{32}\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14}\\ a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}+a_{42}\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14}\\ a_{33} & a_{34}\end{vmatrix}, \tag{7}$$

$$\Delta_3=\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14}\\ a_{22} & a_{23} & a_{24}\\ a_{42} & a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}=a_{12}\begin{vmatrix} a_{23} & a_{24}\\ a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}- -a_{22}\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14}\\ a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}+a_{42}\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14}\\ a_{33} & a_{34}\end{vmatrix}, \tag{8}$$

$$\Delta_4=\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14}\\ a_{22} & a_{23} & a_{24}\\ a_{32} & a_{33} & a_{34}\end{vmatrix}=a_{12}\begin{vmatrix} a_{23} & a_{24}\\ a_{32} & a_{34}\end{vmatrix}- -a_{22}\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14}\\ a_{33} & a_{34}\end{vmatrix}+a_{32}\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14}\\ a_{22} & a_{24}\end{vmatrix}. \tag{9}$$

В выражениях (6)-(9) , в свою очередь, соответственно найдем

$$\begin{vmatrix} a_{33} & a_{34}\\ a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}=a_{33}a_{44}-a_{34}a_{43};$$

$$\begin{vmatrix} a_{23} & a_{24}\\ a_{43} & a_{44}\end{vmatrix}=a_{23}a_{44}-a_{24}a_{43};$$

$$\begin{vmatrix} a_{23} & a_{24} \\ a_{33} & a_{34} \end{vmatrix} = a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33};$$

$$\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14} \\ a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = a_{13}a_{44} - a_{14}a_{43};$$

$$\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14} \\ a_{33} & a_{34} \end{vmatrix} = a_{13}a_{34} - a_{14}a_{33};$$

$$\begin{vmatrix} a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{34} \end{vmatrix} = a_{23}a_{34} - a_{24}a_{32};$$

$$\begin{vmatrix} a_{13} & a_{14} \\ a_{22} & a_{24} \end{vmatrix} = a_{13}a_{24} - a_{14}a_{22}.$$

Подставляя (6)÷(9) в (5) и произведя некоторые преобразования, получим выражение (5) в виде

$$\begin{aligned} \Delta = p^6 \Big\{ (AC - AB) \Big[J_1 J_2 + J_1 \left(k_2 + k_0 i_2^2 \right) + \\ + J_2 \left(k_1 + k_2 i_1^2 \right) \Big] + J_1 J_2 k_1 (A + C) \Big\} + p^4 \Big\{ (AC - AB) \times \\ \times \left(k_1 k_2 l_1^2 l_4^2 + k_0 k_1 l_1^2 l_3^2 + + k_0 k_2 l_2^2 l_4^2 \right) + A \Big(J_1 k_0 k_2 l_3^2 + \\ + J_2 \left(k_1 k_2 + k_0 k_2 i_1^2 \right) \Big) + C \Big(J_1 \left(k_1 k_2 + k_0 k_2 i_2^2 \right) + \\ + J_2 \left(k_1 + k_2 i_1^2 \right) \Big) \Big\} + p^2 \Big\{ A \left(k_0 k_1 k_2 l_1^2 l_3^2 + k_0 k_1 k_2 l_1 l_2 l_3 \right) + \\ + C k_0 k_1 k_2 l_2^2 l_3^2 + B k_0 k_1 k_2 l_1 l_2 l_3 \Big\} + k_0 k_1^2 k_2 l_1^2 l_2 l_3 l_4 - k_1^2 k_2^2 l_1^2 l_4^2 = 0, \end{aligned} \tag{10}$$

где $i_1 = \dfrac{l_2}{l_1}$; $i_2 = \dfrac{l_3}{l_4}$.

Полагая, что $k_0 k_1^2 k_2 l_1^2 l_2 l_3 l_4 - k_1^2 k_2^2 l_1^2 l_4^2 = 0$, получим частотное уравнение в виде

$$\begin{aligned} \Delta = p^6 \Big\{ (AC - AB) \Big[J_1 J_2 + J_1 \left(k_2 + k_0 i_2^2 \right) + \\ + J_2 \left(k_1 + k_2 i_1^2 \right) \Big] + J_1 J_2 k_1 (A + C) \Big\} + \\ + p^4 \Big\{ (AC - AB) \Big(k_1 k_2 l_1^2 l_4^2 + k_0 k_1 l_1^2 l_3^2 + \\ + k_0 k_2 l_2^2 l_4^2 \Big) + A \Big(J_1 k_0 k_2 l_3^2 + J_2 \left(k_1 k_2 + k_0 k_2 i_1^2 \right) \Big) + \\ + C \Big(J_1 \left(k_1 k_2 + k_0 k_2 i_2^2 \right) + J_2 \left(k_1 + k_2 i_1^2 \right) \Big) \Big\} + \\ + p^2 \Big\{ A \left(k_0 k_1 k_2 l_1^2 l_3^2 + k_0 k_1 k_2 l_1 l_2 l_3 \right) + \\ + C k_0 k_1 k_2 l_2^2 l_3^2 + B k_0 k_1 k_2 l_1 l_2 l_3 \Big\} = 0. \end{aligned} \tag{11}$$

Серьезные упрощения можно получить, принимая $J_1 = 0$, $J_2 = 0$. В этом случае, система (3) может быть приведена к виду:

$$\begin{aligned} A\ddot{y}_1 + B\ddot{y}_2 + k_1 y_1 - k_1 l_1 \varphi_1 = 0, \\ C\ddot{y}_2 + B\ddot{y}_1 + k_2 y_2 - k_2 l_4 \varphi_2 = 0, \\ \varphi_1 \left(k_1 l_1^2 + k_0 l_2^2 \right) - y_1 k_1 l_1 - y_2 k_0 l_2 l_3 = 0, \\ \varphi_2 \left(k_2 l_4^2 + k_0 l_3^2 \right) - y_2 k_2 l_4 - y_1 k_0 l_2 l_3 = 0. \end{aligned} \tag{12}$$

Вводя обозначения: $a = k_1 l_1^2 + k_0 l_2^2$; $a_1 = k_2 l_4 a$; $b = k_2 l_4^2 + k_0 l_3^2$; $b_1 = k_0 k_1 l_1 l_2 l_3$; $c_1 = ab - k_0^2 l_2^2 l_3^2$; $c_2 = k_1 k_2 l_1^2 l_4^2 + k_1 k_0 l_1^2 l_3^2 + k_0 k_2 l_2^2 l_4^2$; $a_2 = b k_1 l_1$; $b_2 = k_0 k_2 l_2 l_3 l_4$, получим

$$\begin{aligned} A\ddot{y}_1 + B\ddot{y}_2 + k_1 y_1 - \frac{k_1 l_1}{c_1} \left(y_1 a_2 + b_2 y_2 \right) = 0, \\ C\ddot{y}_2 + B\ddot{y}_1 + k_2 y_2 - \frac{k_2 l_4}{c_1} \left(y_2 a_1 + b_1 y_1 \right) = 0. \end{aligned} \tag{13}$$

Полагая, как и выше, что $\dfrac{l_2}{l_1} = i_1$ и $\dfrac{l_3}{l_4} = i_2$, найдем

$$\begin{aligned} A\ddot{y}_1 + B\ddot{y}_2 + y_1 \frac{k_1 k_2 k_0 \cdot i_1^2 i_2^2}{k_1 k_2 + k_0 k_2 i_1^2 + k_1 k_0 i_2^2} - \\ - y_2 \frac{k_1 k_2 k_0 \cdot i_1 i_2}{k_1 k_2 + k_0 k_2 i_1^2 + k_1 k_0 i_2^2} = 0, \\ C\ddot{y}_2 + B\ddot{y}_1 + y_2 \frac{k_1 k_2 k_0 \cdot i_1^2 i_2^2}{k_1 k_2 + k_0 k_2 i_1^2 + k_1 k_0 i_2^2} - \\ - y_1 \frac{k_1 k_2 k_0 \cdot i_1 i_2}{k_1 k_2 + k_0 k_2 i_1^2 + k_1 k_0 i_2^2} = 0, \\ C\ddot{y}_2 + B\ddot{y}_1 + y_2 \frac{k_1 k_2 k_0 \cdot i_1^2 i_2^2}{k_1 k_2 + k_0 k_2 i_1^2 + k_1 k_0 i_2^2} - \\ - y_1 \frac{k_1 k_2 k_0 \cdot i_1 i_2}{k_1 k_2 + k_0 k_2 i_1^2 + k_1 k_0 i_2^2} = 0. \end{aligned} \tag{14}$$

На рис.3, 4 показаны полная и приведенная ($J_1, J_2 = 0$) структурные схемы эквивалентной САУ, соответствующей рис.2.

Особенностью перекрестных связей, на структурной схеме (рис.3) является то, что они симметричны и зависят от соотношения параметров механической цепи. Однако, структура передаточной и перекрестной связи такова, что при $B > 0$ связь не может принимать нулевое значение. Учитывая то, что B определяется по формуле $B = \dfrac{ML_1 L_2 - J}{\left(L_1 + L_2 \right)^2}$, тогда при определенных условиях выполняется соотношение $J > ML_1 L_2$.

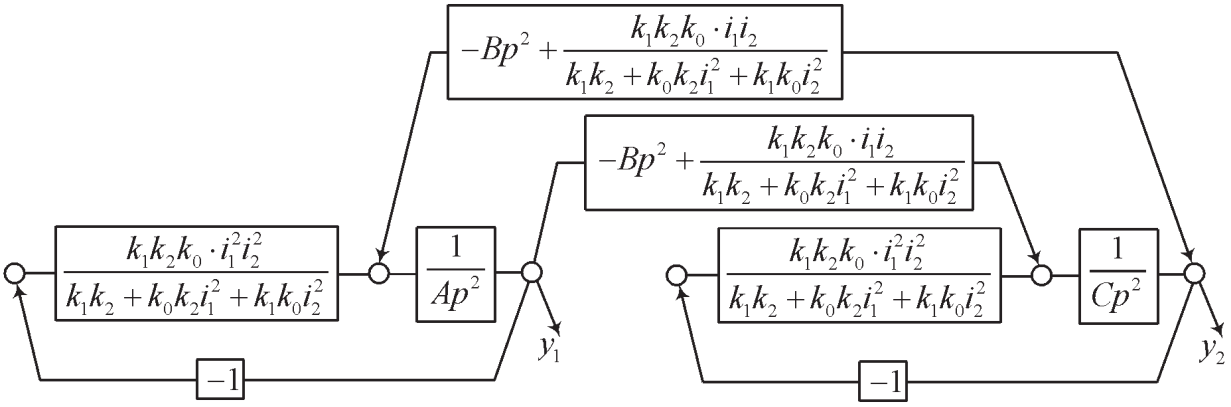


Рис.3. Структурная схема эквивалентной САУ.

При внешнем воздействии, например, в виде силы P, приложенной в точке I (рис.4), передаточная функция по y_2 имеет вид

$$W=\frac{y_2}{P}=\frac{R}{\left(Ap^2+E\right)\left(Cp^2+E\right)-R^2}, \qquad (15)$$

а частотное уравнение на основе (15) после некоторых преобразований соответственно -

$$p^4[AC-B]+p^2\left[E(A+C)+\frac{2Bk_0k_1k_2i_1i_2}{\beta}\right]+ \\ +\frac{k_0^2k_1^2k_2^2\left(i_1^2i_2^2-1\right)i_1^2i_2^2}{\alpha}=0, \qquad (16)$$

где $E=\dfrac{k_1k_2k_0\cdot i_1^2i_2^2}{k_1k_2+k_0k_2i_1^2+k_1k_0i_2^2}$;

$$\alpha=k_1^2k_2^2+2k_1k_2^2k_0i_1^2+2k_1^2k_2k_0i_2^2+ \\ +2k_0^2k_1k_2i_1^2i_2^2+k_0^2k_2^2i_1^4+k_0^2k_1^2i_2^4,$$

$$\beta=k_1k_2+k_0k_2i_1^2+k_1k_0i_2^2.$$

Если в выражении (16) выполняется условие $i_1^2i_2^2-1=0$, то имеем биквадратное уравнение

$$p^2\left\{[AC-B]p^2+\left[E(A+C)+\frac{2Bk_0k_1k_2i_1i_2}{\beta}\right]\right\}=0, \qquad (17)$$

что предполагает решение при $p=0$, а второе решение будет связано с колебаниями: частота собственных колебаний определится по формуле

$$\omega_{соб}=\sqrt{\frac{E(A+C)+\dfrac{2Bk_0k_1k_2i_1i_2}{\beta}}{[AC-B]}}. \qquad (18)$$

Отметим также, что в системе возможно и динамическое гашение, если рассмотреть передаточную функцию

$$W=\frac{y_1}{P}=\frac{Cp^2+E}{\left(Ap^2+E\right)\left(Cp^2+E\right)-R^2}, \qquad (19)$$

откуда найдем

$$\omega_{дин}=\sqrt{\frac{E}{C}}. \qquad (20)$$

Если условие $i_1^2i_2^2-1\neq 0$, то частотное уравнение приводится к биквадратному уравнению

$$p^4[AC-B]+p^2\left[E(A+C)+\frac{2Bk_0k_1k_2i_1i_2}{\beta}\right]+ \\ +\frac{k_0^2k_1^2k_2^2\left(i_1^2i_2^2-1\right)i_1^2i_2^2}{\alpha}=0. \qquad (21)$$

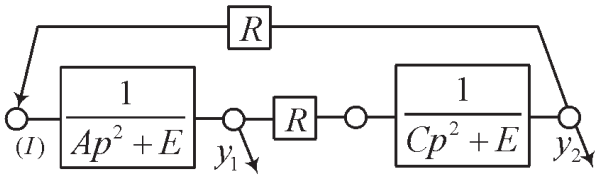


Рис.4. Структурная схема приведенной эквивалентной САУ для которой приняты обозначения:

$$E=\frac{k_1k_2k_0\cdot i_1^2i_2^2}{k_1k_2+k_0k_2i_1^2+k_1k_0i_2^2};$$

$$R=Bp^2-\frac{k_1k_2k_0\cdot i_1i_2}{k_1k_2+k_0k_2i_1^2+k_1k_0i_2^2}.$$

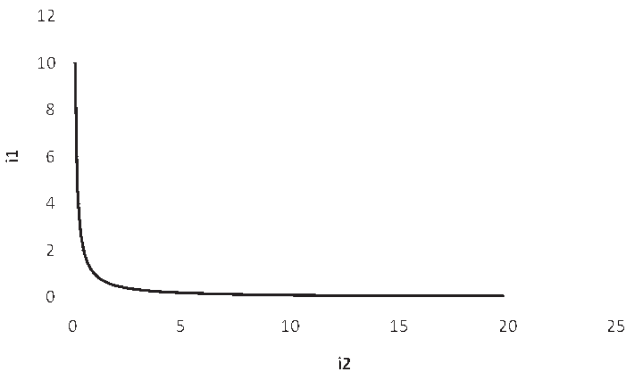


Рис. 5. График зависимости i_1 от i_2.

Исследование (17) показывает возможности существования решения при $p=0$, что соответствует независимой форме движения. Последнее действительно может существовать в силу структурных и конструктивных особенностей упругого подвеса. Однако, такое движение характеризуется тем, что его реальные параметры ограничиваются физическими возможностями элементов. Из (21) можно определить частоты собственных колебаний, однако в этом случае надо произвести также оценку устойчивости системы.

Если полагать, что момент инерции твердого тела мал и $J \approx 0$, то можно получить ряд соотношений, из которых следует, что параметры изменятся и исчезает знаковая неопределенность:

$$A = \frac{ML_2^2}{\left(L_1 + L_2\right)^2};\ B = \frac{ML_1 L_2}{\left(L_1 + L_2\right)^2};\ C = \frac{ML_1^2}{\left(L_1 + L_2\right)^2},$$

при этом остальные параметры системы не изменяются.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Дружинский И.А. Механические цепи. Издательство «Машиностроение». Ленинград. 1977.- 270с.
2. Гальперин И.И. Автоматика как односторонняя механика. Машгиз. Москва. 1964.- 264с.
3. Иванов Б.Г. Разработка методов расчета динамики и прочности агрегатов транспортной техники с рычажно-шарнирными кинематическими связями// Автореферат дис. на соиск. уч. ст. д.т.н. Самарский государственный аэрокосмический университет. Самара. 2007.- 48с.
4. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Рычажные связи в передаче механических воздействий// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. Вып№2(14). Иркутск. 2007. С.38-47.
5. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Особенности параллельных соединений в механических цепях// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. Вып№2(14). Иркутск. 2007. С.102-104.
6. Елисеев С.В., Засядко А.А., Упырь Р.Ю. Новый подход в оценке возможности последовательного соединения элементов в структурных интерпретациях механических колебательных систем// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. Вып№1(13). Иркутск. 2007. С.88-100.

Кобзов Д.Ю., Дэлэг Д.,
Жмуров В.В., Лханаг Д.

УДК 69.002.51.192:621.225.2

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ОПОР ГИДРОЦИЛИНДРА ПРИВОДА КОВША ОДНОКОВШОВЫХ ГИДРОФИЦИРОВАННЫХ ДОРОЖНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Увеличение единичных мощностей гидрофицированных машин приводит к увеличению мощности гидроагрегатов, в частности, гидроцилиндров, интенсивности их использования во времени и, вместе с тем, к снижению надежности, что отрицательно влияет на эффективность использования машин в целом [1,2]. Повышение нагрузок, действующих на конструктивные элементы гидроцилиндров, привело к тому, что участились случаи их отказов из-за разрушения деталей в результате потери ими прочности. В этих условиях в число основных параметров технического состояния гидроцилиндров наряду с параметрами герметичности [3] выдвигаются параметры нагрузочной (несущей) способности.

Несущую способность гидроцилиндра принято описывать его напряженно-деформированным состоянием, которое определяется полным прогибом и напряжениями в его опасном сечении [2,4,5].

Значительная доля в величине прогиба и в значениях напряжений приходится на величину полного эксцентриситета приложения продольного сжимающего усилия в опорах гидроцилиндра [4,5,7]. Его величина определяется как сумма статического и кинематического эксцентриситетов [6,7]. В процессе эксплуатации величина эксцентриситета вследствие изнашивания опорных подшипников заметно увеличивается [2,6,7]. Тогда как, первый увеличивается по мере выдвижения штока и уменьшается по мере приближения гидроцилиндра к вертикальному положению, второй полностью зависит только от угла поворота элементов опорных подшипников проушин [2,6,7].

Гидрофицированный привод поворота ковша, содержит гидроцилиндр 1, шарнирно соединенный с ним поворотный рычаг 2 и тягу 3, шарнирно прикрепленную к рычагу и ковшу 4 (рис.1). При этом элементы крепления гидроцилиндра выполнены в виде проушин (рис. 2) [4,7].

Для снижения негативного влияния эксцентриситета на несущую способность гидроцилиндра предлагается заменить его опорные проушины на цапфы, что является новым техническим решением и защищено патентами РФ [8,9].

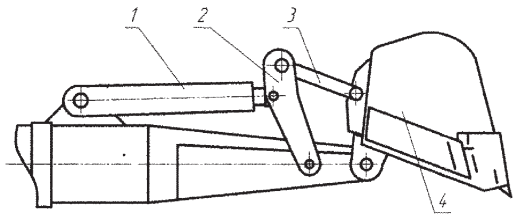


Рис.1. Схема гидрофицированого привода поворота ковша традиционного исполнения.

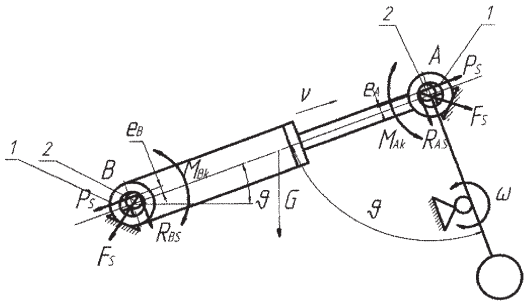


Рис.2. Расчётная схема гидрофицированного привода рабочего оборудования гидрофицированой машины: 1 - проушина гидроцилиндра, 2 - ось звена гидрофицированного привода.

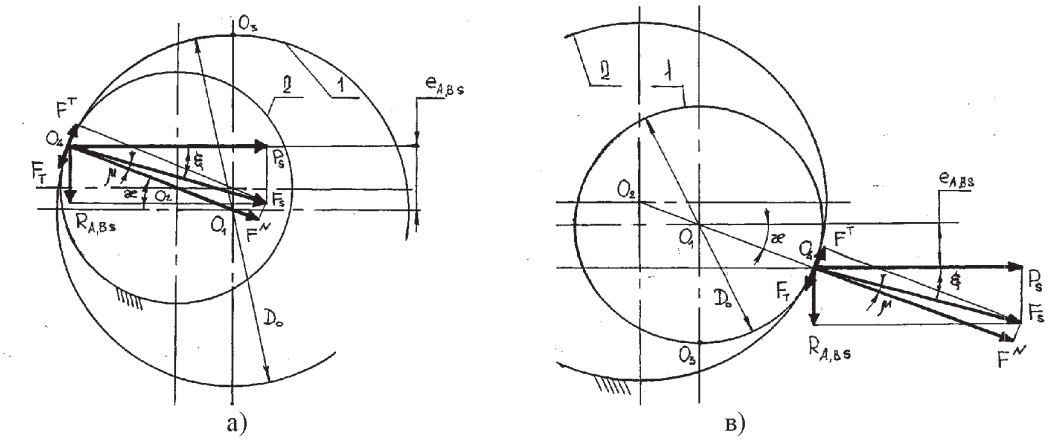


Рис.3. Образование статического эксцентриситета в опоре гидроцилиндра: а – для проушин; в – для цапф.

Рассмотрим в сравнении с традиционным креплением [1,2] вариант перспективного исполнения элементов крепления гидроцилиндра, например, с обеими цапфами [8,9].

Методика исследования эксцентриситета в проушинах гидроцилиндра достаточно полно представлена в работах [2,4,6,7,10].

Полный эксцентриситет $e_{A,B}$ в опорах гидроцилиндра в общем случае равен [2, 6]

$$e_{A,B} = e_{A,BS} + e_{A,BK}. \qquad (1)$$

Статический эксцентриситет $e_{A,BS}$ приложения продольного сжимающего усилия P к цапфе гидроцилиндра, предшествующий моменту начала относительного поворота опорных элементов 1 и 2 (рис. 3), достаточно полно описан в работах [2,6].

При последующем после образования статического эксцентриситета движении штока, сопровождающемся поворотом приводимого гидроцилиндром звена рабочего оборудования и опорных элементов друг относительно друга, место их контакта из точки O_4 смещается в точку O_5 (рис.4) либо в точку O_7 (рис.5) в зависимости от направления поворота элементов опор (увеличения или уменьшения угла θ) с возможностью останова в точках O_6 или O_8 и с образованием кинематического эксцентриситета $e_{A,BK}$ с конкретным значением.

Кинематический эксцентриситет $e_{A,BK}$ (Рис. 4,5) конкретно для каждого из перечисленных случаев соответственно [6,7,9] составляет:

– при увеличении угла θ (рис.4):

– для условия

$$\theta > (\eta + \kappa) = (\nu + \mu) = (arctgk_r + arctgk_f)$$

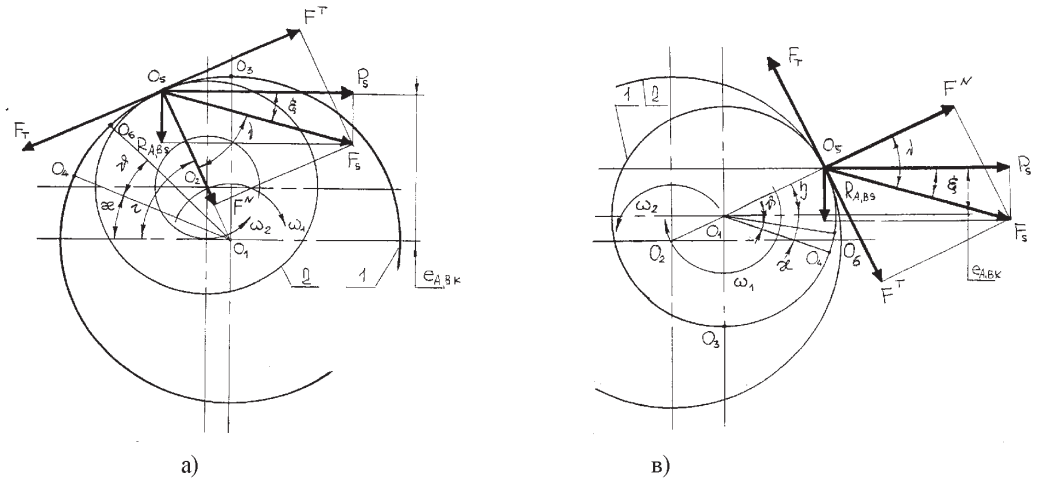
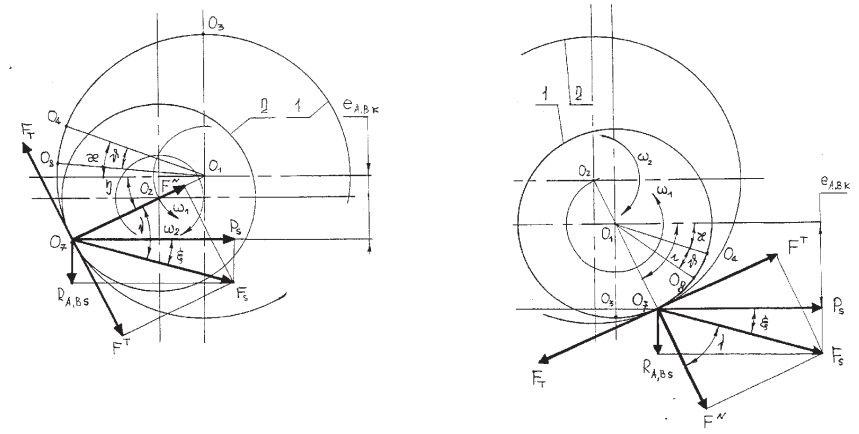


Рис.4. Образование кинематического эксцентриситета в опоре гидроцилиндра при увеличение угла θ (рис. 2): а – для проушин; в – для цапф.



а) в)

Рис.5. Образование кинематического эксцентриситета в опоре гидроцилиндра при уменьшении угла θ (рис. 2): а – для проушин; в – для цапф.

$$e_{A,BK} = D_o \sin\left[\frac{(\nu+\mu)}{2}\right]\cos\left[\frac{(\nu-\mu-2\xi)}{2}\right] = D_o \sin\left[\frac{(arctgk_r + arctgk_f)}{2}\right]\times \cos\left\{\frac{\left[arctgk_r - arctgk_f - 2\cdot arctg\left(\frac{R_{A,BS}}{P}\right)\right]}{2}\right\}; \quad (2)$$

– для условия

$$\theta < (\eta+\kappa) = (\nu+\mu) = (arctgk_r + arctgk_f),$$

$$e_{A,BK} = D_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left\{\frac{[2(\mu+\xi)-\theta]}{2}\right\} = D_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left[arctgk_f + arctg\left(\frac{R_{A,BS}}{P}\right) - \frac{\theta}{2}\right]; \quad (3)$$

- при уменьшении угла θ (рис.5):

– для условия

$$\theta > (\iota-\kappa) = (\nu-\mu) = (arctgk_r - arctgk_f),$$

$$e_{A.Bk} = -D_0 \sin\left[\frac{(\nu-\mu)}{2}\right]\cos\left[\frac{(\nu+\mu+2\xi)}{2}\right] = -D_0 \sin\left[\frac{(arctgk_r - arctgk_f)}{2}\right]\times \cos\left\{\frac{\left[arctgk_r + arctgk_f + 2\cdot arctg\left(\frac{R_{A,BS}}{P}\right)\right]}{2}\right\}; \quad (4)$$

– для условия

$$\theta < (\iota-\kappa) = (\nu-\mu) = (arctgk_r - arctgk_f),$$

$$e_{A,BK} = -D_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left\{\frac{[2(\mu+\xi)+\theta]}{2}\right\} = -D_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left[arctgk_f + arctg\left(\frac{R_{A,BS}}{P}\right) + \frac{\theta}{2}\right], \quad (5)$$

где D_0 — номинальный диаметр опорных подшипников гидроцилиндра; k_f - коэффициент трения; k_r - коэффициент сцепления элементов опорных подшипников; P - продольное сжимающее усилие; $R_{A,BS}$ — реакции, возникающие в опорных подшипниках от веса гидроцилиндра.

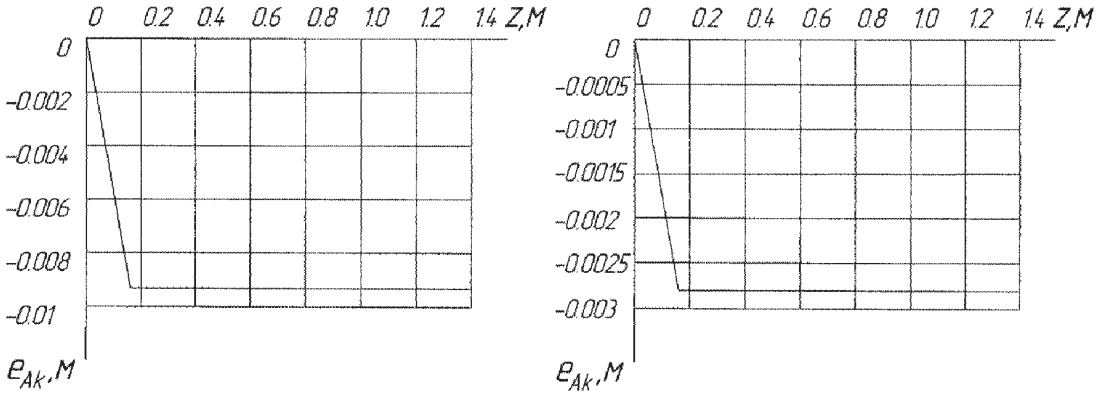
Кинематический эксцентриситет для цапф гидроцилиндра привода ковша ДСМ с обратной лопатой в точке А описывается системой двух уравнений (2), (3) (рис.6), а в точке В — системой двух, трёх или четырёх уравнений (2)-(5) (рис.7) в зависимости от кинематики исследуемого привода и состояния опор [7, 10].

Графики, описывающие изменения полного эксцентриситета для точек А и В, показаны на рисунках 8, 9.

Для описания эпюры распределения полного эксцентриситета $e(x)$ (рис.10) по длине гидроцилиндра можно воспользоваться функцией [2,6,7]

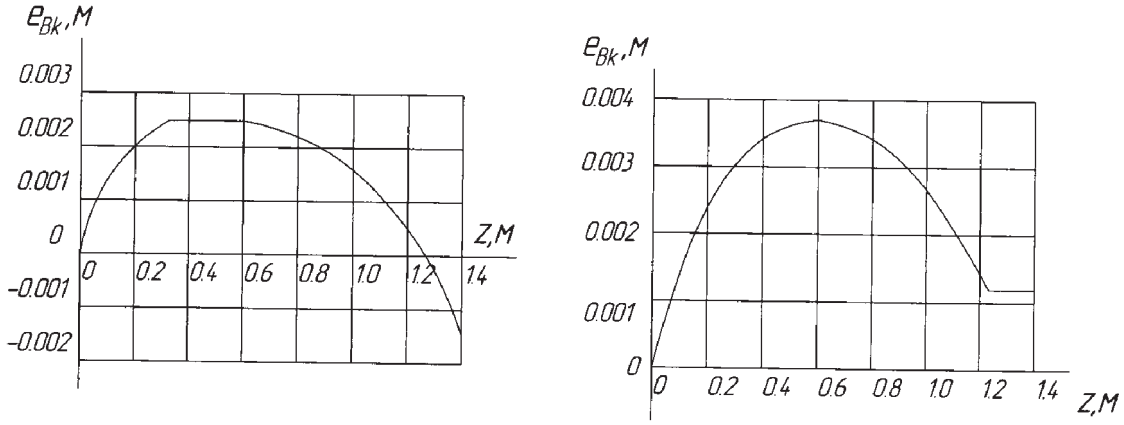
$$e(x) = e_{A,B} + x\cdot tg\lambda \approx e_{A,B} + x\cdot\lambda, \quad (7)$$

где угол λ — составляет



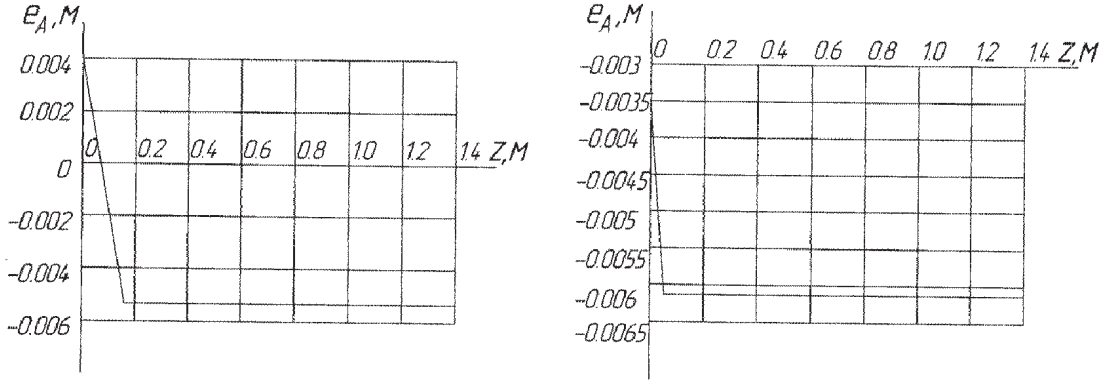
а) в)

Рис.6. Зависимость изменения кинематического эксцентриситета в опоре штока гидроцилиндра (т. А) от величины z: а – для проушин; в – для цапф.



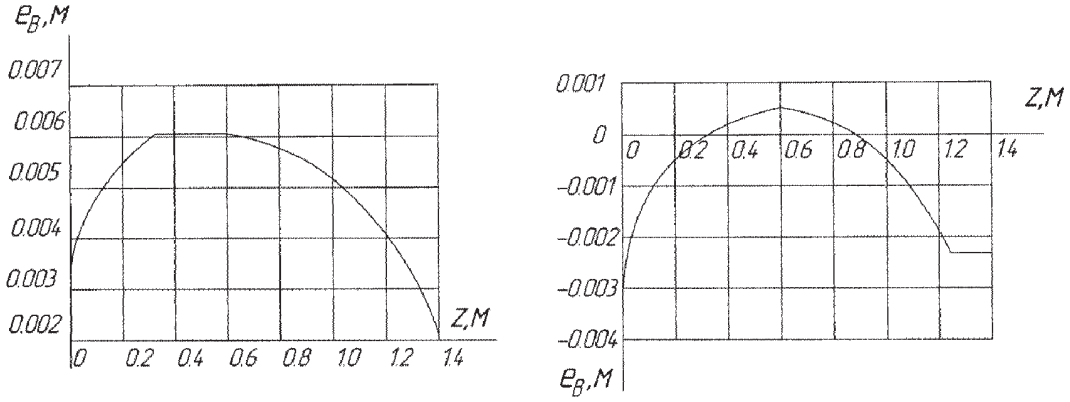
а) в)

Рис.7. Зависимость изменения кинематического эксцентриситета в опоре корпуса гидроцилиндра (т. В) от величины z: а – для проушин; в – для цапф.



а) в)

Рис.8. Зависимость изменения полного эксцентриситета в опоре штока гидроцилиндра (т. А) от величины z: а – для проушин; в – для цапф.



а) в)

Рис.9. Зависимость изменения полного эксцентриситета в опоре корпуса гидроцилиндра (т. В) от величины z: а – для проушин; в – для цапф.

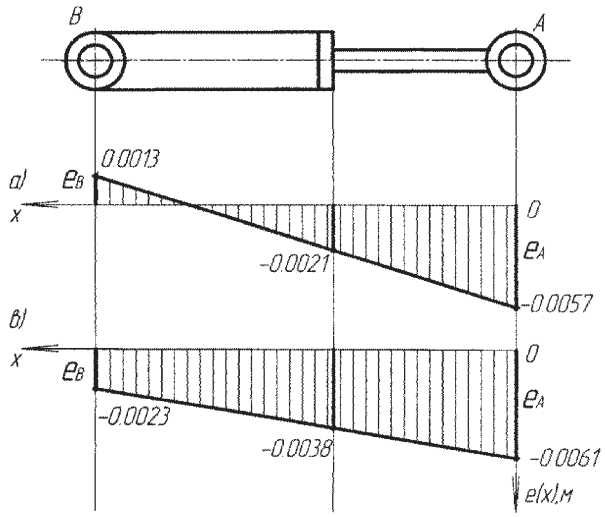


Рис. 10. Эпюра распределения полного эксцентриситета $e(x)$ по длине гидроцилиндра: а – для проушин; в – для цапф.

$$\lambda = arctg\left[\frac{e_B - e_A}{l_3 + \left(l_0 + z\right) - l_6}\right].$$

В последней записи параметры l_0, l_3 и l_6 являются характеристиками расчётной схемы продольно-поперечно нагруженного гидроцилиндра [2].

В координате опасного сечения, для рабочего оборудования прямая и обратная лопата привода ДСМ напряжение $\sigma(x)$, находится из выражения [2,4,5,7]

$$\sigma(x) = \frac{P}{F(x)} + \frac{M_Q(x)}{W(x)} + \frac{P \cdot y_T(x)}{W(x)} + \frac{P \cdot e(x)}{W(x)} \pm \frac{M_R}{W(x)}. \quad (8)$$

В известном уравнении (8) четвёртое слагаемое напрямую связано с эксцентриситетом $e(x)$ и, будучи отрицательным, положительно сказывается на несущей способности гидроцилиндра. Причём, применение цапф усиливает его.

Распределения по длине гидроцилиндра эксцентриситетов $e_S(x)$ и $e_K(x)$ аналогичны предыдущему с собственными исходными характеристиками.

В случае, когда угол взаимоповорота опорных элементов гидроцилиндра меньше разности углов трения и сцепления (условие 2, 5) в точках останова O_6 или O_8 (рис.4,5) при выдвижении штока на величину z, возникает силовое проскальзывание, которое создает дополнительный изгибающий момент M_R [6,7] и графически отображается прямой линией параллельной оси z (рис. 6 - 9). Причем в опоре А оно наблюдается на значительной длине выдвижения штока z (рис. 6, 8).

Такое проскальзывание, несмотря на негатив, а именно, увеличение износа элементов опор, создаёт изгибающий момент M_R, имеющий знак «-» в уравнении (8), что по отношению к несущей способности гидроцилиндра в данном примере играет положительную роль. Однако, названный эффект не всегда имеет место и зависит, главным образом, от кинематики привода.

Следует отметить, что этим влияние характеристик $e(x)$ и M_R на несущую способность гидроцилиндра не ограничивается. Влияя на прогиб $y_T(x)$ через составляющую $y_P(x)$

[2], они косвенно могут значительно её изменять.

Приведённый сравнительный анализ традиционных (проушин) и перспективных (цапф) опор гидроцилиндра с позиции их влияния на его несущую способность на примере привода рабочего оборудования одноковшовых гидрофицированных ДСМ показывает целесообразность создания более эффективного привода машин при оптимальном назначении величин эксцентриситетов в опорах исполнительного гидроцилиндра.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Кобзов Д.Ю. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 1. Конструкция. Надёжность. Перспективы развития. Деп. в МАШМИР №2. сд98 от 29.09.98 г. - 59 с.
2. Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Трофимов А.А. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 2. Условия эксплуатации, рабочий процесс, режим работы и параметры нагужения. Деп. БрГТУ в ВИНИТИ №3552-1399 108 с.
3. Кобзов Д.Ю., Сергеев А.П., Лханаг Д. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 4. Герметизирующая способность. Деп. в ВИНИТИ 14.07.2003 №1376-В203. - 44 с.
4. Кобзов Д.Ю., Плешивцева С.В., Трофимов А.А., Лханаг Д., Жмуров В.В. Аналитическое представление несущей способности гидроцилиндров машин. Труды Братского государственного технического университета. — Том 2. — Братск, БрГТУ, 2003. С. 47-51.
5. Кобзов Д.Ю., Плешивцева С.В., Перевощиков Е.А., Иванов В.А. Программа для определения параметров напряженно-деформируемого состояния гидроцилиндров машин. Естественные и научные науки — развитию регионов: Материалы межрегиональной научно-технической конференции. — Братск; БрГТУ, 2003. С. 13-14.
6. Кобзов Д.Ю., Тимошенко А.А. Об эксцентричном нагружении гидроцилиндра в опорах. Деп. в МАШМИР №48- сд92 от 10.12.92 г. - 23 с.
7. Кобзов Д.Ю., Жмуров В.В., Першин С.А. Аналитическое представление эксцентриситета в проушине гидроцилиндра одноковшового экскаватора. Механики XXI веку. V Межрегиональная научно-техническая конференция с международным участием: Сборник докладов. — Братск; БрГУ, 2006. С. 27-31.
8. Кобзов Д.Ю., Сергеев А.П., Губанов В.Г. и др. Гидроцилиндр. Патент № 1807255. Роспатент от 10.10.92.
9. Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Свиридо И.В. Гидроцилиндр. Патент № 2072455. Роспатент от 20.05.97.
10. Кобзов Д.Ю., Жмуров В.В., Плешивцева С.В. Совершенствование конструкции привода ковша одноковшовых гидрофицированных дорожных и строительных машин. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал 2007 №3(15). С. 40-46.

Кузнецов Н.К.

УДК 621.01:534

ГАШЕНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ УПРАВЛЯЕМОЙ МАШИНЫ С ПОМОЩЬЮ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Автоматизация производства и развитие систем автоматического управления механическим движениям приводят к широкому применению технологического оборудования и машин с программным управлением, представляющих собой совокупность двигательного, передаточного и исполнительного механизмов, связанных в единое целое посредством различных связей и программного обеспечения. Одной из актуальных проблем создания подобных машин является проблема ограничения упругих колебаний исполнительных механизмов в переходных режимах работы. Перспективным путем ее решения является использование дополнительных связей активного и пассивного типов [1]. В настоящей статье приводятся результаты исследований эффективности дополнительных связей на основе упругих элементов, вводимых в управляемую машину с одной степенью подвижности.

Как показано в работе [2], если соединить обычно неподвижный элемент привода машины (гидро-, пневмоцилиндр, статор электродвигателя) с неподвижным основанием посредством упругого элемента, то при определенном выборе параметров системы масса привода будет играть роль динамического гасителя колебаний исполнительного механизма. Расчетная схема системы гашения колебаний управляемой машины на основе дополнительной упругой связи показана на рис. 1. На этой схеме приняты следующие обозначения: m_1 — суммарная масса движущихся и обычно неподвижных частей привода; m_2 — масса исполнительного механизма; b_1, c_1 — соответственно коэффициенты жесткости и демпфирования дополнительного упругого элемента; c_2 — коэффициент жесткости исполнительного механизма; $F(t)$ — возмущающее воздействие; *УД* — управляемый демпфер. Последний обеспечивает либо жесткое, либо упругое соединение массы m_1 с основанием. Он может быть выполнен, например, в виде гидроцилиндра двухстороннего действия, управляемого с помощью золотника [3].

Исследуем эффективность компенсации упругих колебаний исполнительного механизма с помощью этой связи. Рассмотрим случай воздействия на систему возмущения в виде единичной δ – функции Дирака, полагая, что величина импульса силы равна c_2.

Тогда в момент времени $t=0$: $q_1=\dot{q}_2=\dot{q}_1=0$, $q_2=f_0^2$. Дифференциальные уравнения движения системы при открытом *УД* будут иметь вид

$$\dot{q}_1+2\xi\dot{q}_1+f_0^2q_1+v\omega_0^2(q_1-q_2)=0; \qquad (1)$$

$$\ddot{q}_2+\omega_0^2(q_2-q_1)=F(t)\,/\,m_2, \qquad (2)$$

где $\xi=b_1\,/\,2m_1$; $f_0=\sqrt{c_1\,/\,m_1}$ - частота собственных колебаний массы привода; $\omega_0=\sqrt{c_2\,/\,m_2}$ - частота собственных колебаний массы исполнительного механизма; $v=m_2\,/\,m_1$ - коэффициент отношения масс; $F(t)$ — возмущающее воздействие.

Преобразуя по Лапласу уравнения (1) и (2) с учетом начальных условий, найдем изо-

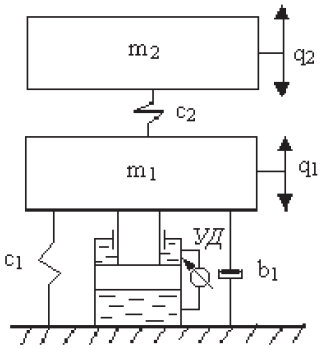


Рис.1. Расчетная схема исполнительного механизма с дополнительной упругой связью.

бражение координаты $q_2(p)$ исполнительного механизма

$$q_2(p)=\frac{(p_0^2+2\xi p_0+f_0^2+v\omega_0^2)\omega_0^2}{p_0^2+2\xi p_0^3+(f_0^2+v\omega_0^2+\omega_0^2)p_0^2+2\xi\omega_0^2 p_0+\omega_0^2 f_0^2}.$$

Принимая $p=p_0/\omega_0$; $\mu=\xi/\omega_0$; $\omega=f_0/\omega_0$, приведем это выражение к безразмерному виду

$$q_2(p)=\frac{b_3p^2+b_2p^2+b_1p+b_0}{a_4p^4+a_3p^3+a_2p^2+a_1p+a_0}, \qquad (3)$$

где

$a_4=1$; $a_3=2\mu$; $a_2=(1+v+\omega^2)$; $a_1=2\mu$; $a_0=\omega^2$;

$b_3=1$; $b_2=2\mu$; $b_1=\omega^2+v$; $b_0=0$; p_0 - символ преобразования по Лапласу; ω, μ - безразмерные коэффициенты соответственно частоты настройки гасителя и вязкости.

Коэффициенты a_i и $b_i(i=\overline{1,4})$ выражения (3) зависят от параметров исполнительного механизма и параметров гасителя ω, μ и v, значения которых необходимо определить. Для оценки эффективности дополнительной упругой связи воспользуемся интегральным квадратичным функционалом

$$J=\frac{\omega^4-2\omega^2+4\mu^2+(v^2+v+1)}{4\omega^2\mu v}. \qquad (4)$$

Значения безразмерных коэффициентов настройки гасителя ω, μ, v, которые обеспечивают минимальную интегральную оценку (4) и, соответственно, минимальное время переходного процесса по координате q_2 отклонения массы исполнительного механизма от положения равновесия, найдем из системы уравнений, полученных путем приравнивания нулю частных производных J по каждому из исследуемых параметров

$$\frac{\partial J}{\partial\omega}=0;\frac{\partial J}{\partial\mu}=0;\frac{\partial J}{\partial v}=0.$$

Искомая система имеет вид

$$\begin{cases}\omega^4-4\mu^2-(v^2+v+1)=0;\\ 4\mu^2+2\omega^2-\omega^4-v(v^2+v+1)=0;\\ 2\omega^2-\omega^4-4\mu^2+v^2-1=0.\end{cases} \qquad (5)$$

Совместное решение системы позволяет установить оптимальные значения параметров настройки гасителя, соответствующие минимальным значениям J. Поскольку масса привода является, как правило, заданной величиной, произведем настройку гасителя по двум параметрам ω и μ, принимая $v=const$. Из системы (5) находим значения

$$\omega_{opt}=\sqrt{\frac{v_3+2v^2+2v+1}{2}}; \qquad (6)$$

$$\mu_{opt}=\sqrt{\frac{v^6+4v^5+8v^4+10v^3+4v^2-3}{16}}. \qquad (7)$$

Результаты расчетов по формулам (6) и (7) показаны на рис. 2, а и б, соответственно.

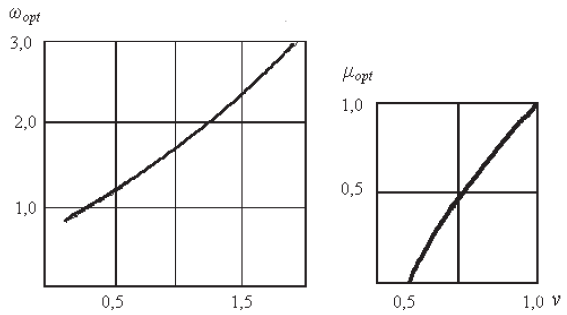
Исследуем эффективность дополнительной упругой связи по отношению к исходной системе. Интегральная оценка для такой системы, полученная аналогичным образом, имеет вид

$$J_0=\frac{4\mu^2+v+1}{4\mu v}. \qquad (8)$$

Условия эффективности определим путем вычисления квадратичных оценок J и J_0 по формулам (4) и (8) с учетом выражений (5) и (7) для различных значений параметров v и μ и нахождения отношений $k_J=J/J_0$. Результаты расчетов приведены на рис. 3, на котором кривые 1-4 получены при значениях параметра v, соответственно равных 0; 0,3; 0,5 и 1,0. Зона эффективной работы гасителя колебаний ограничена абсциссами $k_J=0.5$ и $k_J=1.0$.

Из этого рисунка следует, что увеличение параметра μ до значения $\mu=0.6$ способствует увеличению эффективности гашения колебаний (за исключением случая, когда $v=0$). Возрастание значений параметра v при $0\le\mu\le0.6$ приводит к снижению эффективной работы гасителя, а при $\mu\ge0.6$ - к ее повышению.

Можно показать, что если управлять моментами включения дополнительной упругой связи в течение периода свободных колебаний, то удастся добиться затухания упругих колебаний исполнительного механизма и при изменении собственной частоты. Аналогичный эффект может быть достигнут,



а) б)

Рис.2. Оптимальные значения параметров гасителя упругих колебаний.

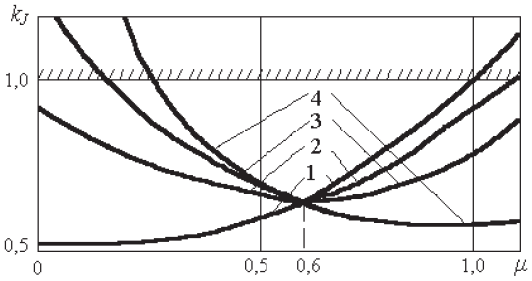


Рис.3. Границы эффективной работы гасителя колебаний.

если вместо дополнительной упругой связи с постоянным коэффициентом жесткости c_1 использовать упругую связь с переменной жесткостью, например в виде управляемого двухкамерного пневматического элемента [3]. В качестве иллюстрации, на рис. 4,а приведены графики упругих колебаний исполнительного механизма, полученные на основе уравнений (1) и (2), при следующих параметрах: $\omega_0 = 40c^{-1}$; $f_0 = 20c^{-1}$; $\xi = 0{,}5$; $\nu = 1{,}0$ (рис. 4, а) и начальных условиях: $q_1(0) = \dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0$; $q_2(0) = 0{,}01$, а на рис. 4, б, в - графики упругих колебаний исполнительного механизма с теми же параметрами, но с изменением парциальной частоты колебаний массы привода по законам

$$\begin{cases} f_0 = 6c^{-1}, \text{ если } sgn(q_2\,\dot{q}_2) > 0, \\ f_0 = 10c^{-1}, \text{ если } sgn(q_2\,\dot{q}_2) \le 0 \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} f_0 = 6c^{-1}, \text{ если } sgn(q_2\,\dot{q}_2) > 0, \\ f_0 = 20c^{-1}, \text{ если } sgn(q_2\,\dot{q}_2) \le 0 \end{cases}$$

соответственно. Сплошные линии на этих графиках соответствуют координате q_1, штриховые — q_2, а штрих-пунктирные $\Delta q = q_2 - q_1$.

Как видно из этих графиков, скачкообразное изменение коэффициента жесткости дополнительной упругой связи приводит к снижению продолжительности колебаний исполнительного механизма. Причем, интенсивность затухания колебаний увеличивается с увеличением разности между минимальной и максимальной частотами колебаний привода f_0 (см. рис. 4,в).

Следует заметить, что дополнительная упругая связь может быть использована и для подавления вынужденных колебаний, возникающих, например, при взаимодействии исполнительного механизма управляемой машины с вибрирующими объектами. Дифференциальные уравнения (1) и (2) при внешнем

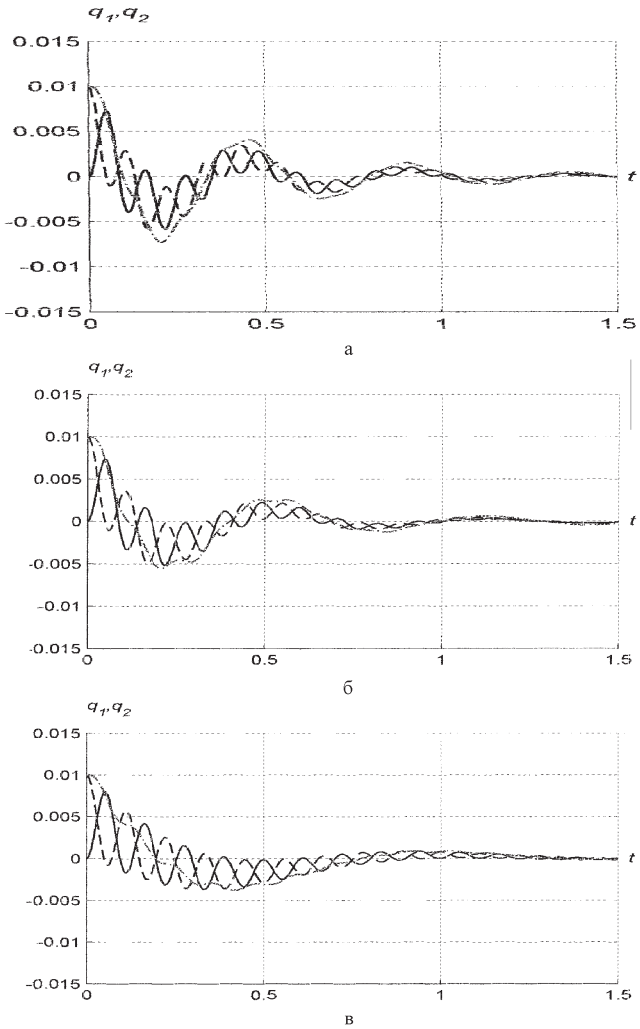


Рис. 4. Графики упругих колебаний исполнительного механизма при изменении жесткости упругого элемента.

гармоническом воздействии на вторую массу и пренебрежении силами трения системы ($b_1 = 0$) примут вид

$$\ddot{q}_1 + f_0^2 q_1 + \omega_0^2 \nu (q_1 - q_2) = 0;$$

$$\ddot{q}_2 + \omega_0^2 (q_2 - q_1) = H_0 \sin \omega t,$$

где H_0, ω - амплитуда и частота возмущающей силы. При соблюдении условия $\omega = (c_1 + c_2) / m_1$ колебания второй массы полностью погашаются. Следовательно, данная связь оказывается эффективной и для гашения вынужденных колебаний исполнительного механизма.

Таким образом, предложенная дополнительная упругая связь позволит путем незначительных изменений исполнительного механизма снизить динамические ошибки и повысить быстродействие и точность работы управляемой машины.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Кузнецов, Н. К. Управление колебаниями упругих мехатронных систем / Н. К. Кузнецов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2005. — № 7. — С. 7-13.
2. Кузнецов, Н. К. Динамическое гашение упругих колебаний управляемых механических систем / Н. К. Кузнецов, В. Я. Тюрин // Динамика управляемых механических систем : сб. научн. тр. / Иркут. политехн. ин-т. — Иркутск, 1982. — С. 57-62.
3. Елисеев, С. В. Управление колебаниями роботов / С. В. Елисеев, Н. К. Кузнецов, А. В. Лукьянов. — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. — 320 с.

Банина Н.В., Гозбенко В.Е.

УДК 656.001

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ (ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ)

Для достижения необходимых динамических параметров виброзащитной системы в базовую модель (рис.1) вводятся дополнительные связи в виде механизма преобразования движения [1,2] с передаточной функцией $W_{gon}(p)$, при этом предполагается, что система совершает вынужденные колебания при кинематических воздействиях, вызванных перемещениями оснований системы $y(t) = h\sin\omega t$, $y_1(t) = h_1 \sin\omega t$ (рис.2).

Структурная схема такой системы представлена на рис.3.

Рассмотрим динамические свойства данной системы. Запишем уравнения движения (без учета дополнительной связи $W_{gon}(p)$)

$$\begin{cases} m\ddot{x} + (c + c_0)x - c_0 x_1 = cy, \\ m_1\ddot{x}_1 + (c_1 + c_0)x_1 - c_0 x = c_1 y_1. \end{cases} \quad (1)$$

Определим передаточные функции системы при $y_1 = 0$, используя структурную схему (рис. 3):

$$W_1(p) = \frac{\bar{x}_1}{\bar{y}} = \frac{\left(m_1 p^2 + c_0 + c_1\right)c}{\Delta(p^2)}; \quad (2)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{x}_2}{\bar{y}} = \frac{c_0 c}{\Delta(p^2)}, \quad (3)$$

где

$$\Delta(p^2) = \left(m_1 p^2 + c_1 + c_0\right)\left(mp^2 + c_0 + c\right) - c_0^2 . \quad (4)$$

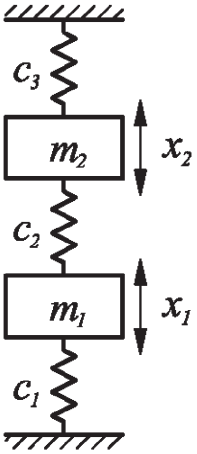


Рис.1. Основная расчетная схема виброзащитной системы с двумя степенями свободы (свободные колебания).

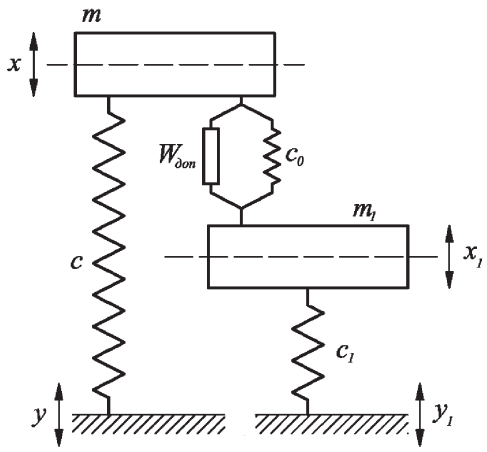


Рис.2. Базовая расчетная схема задач виброзащиты и виброизоляции с учетом свойств и особенностей локального опирания.

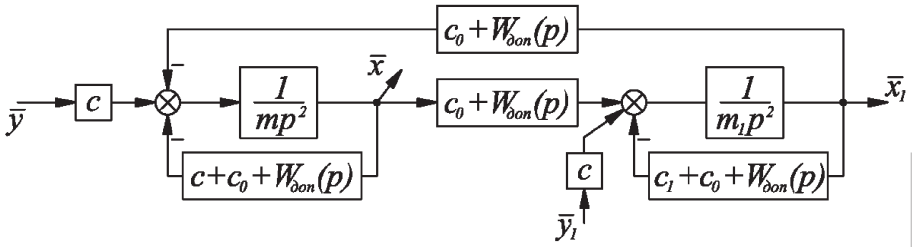


Рис.3. Структурная схема базовой расчетной системы.

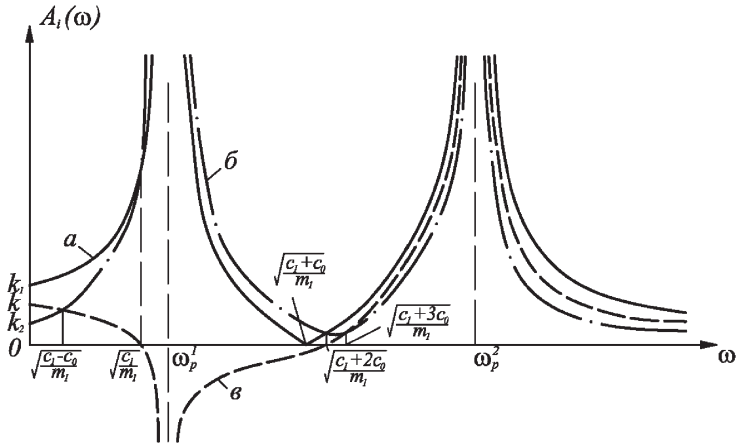


Рис.4. Амплитудно-частотные характеристики связанных колебательных систем при $W_{доп}(p)=0$, $y_1=0$, $\frac{c}{m}>\frac{c_1}{m_1}$, $m<m_1$: а) $A_1(\omega)$; б) $A_2(\omega)$; в) $A_3(\omega)=A_1(\omega)-A_2(\omega)$,

$$k_1=\frac{c(c_0+c_1)}{(c_0+c_1)(c_0+c)-c_0^2};\ k_2=\frac{cc_0}{(c_0+c_1)(c_0+c)-c_0^2};\ k=\frac{c_1c}{(c_0+c_1)(c_0+c)-c_0^2}.$$

Полагая в выражениях (2) – (4) $p=i\omega$, $\omega>0$, находим амплитудно-частотные характеристики системы:

$$A_1(\omega)=\left|\frac{\left(-m_1\omega^2+c_0+c_1\right)c}{\Delta(\omega^2)}\right|, \qquad (5)$$

$$A_2(\omega)=\left|\frac{c_0c}{\Delta(\omega^2)}\right|. \qquad (6)$$

Из анализа выражений (5) и (6) следует, что система при наличии упругой связанности имеет два режима резонанса ω_p^1 и ω_p^2, определяемых из уравнения:

$$\left(-(m_1+L)\omega^2+c_1+c_0\right)\left(-(m+L)\omega^2+c_0+c\right)-\left(c_0-L\omega^2\right)^2=0. \qquad (7)$$

Кроме того, инерционный элемент с массой m имеет режим динамического гашения колебаний, который будет равен парциальной частоте второго инерционного элемента с массой m_1:

$$\omega_r^1=\sqrt{\frac{c_0+c_1}{m_1}}. \qquad (8)$$

Для оценки взаимодействия инерционных элементов колебательной системы с массами m и m_1 рассмотрим изменение значений зависимости $A_3(\omega)=A_1(\omega)-A_2(\omega)$ с увеличением значений частоты внешнего воздействия ω. Графики амплитудно-частотных характеристик $A_1(\omega)$, $A_2(\omega)$ и оценочной величины $A_3(\omega)$ при одновременном выполнении условий $\frac{c}{m}>\frac{c_1}{m_1}$, $m<m_1$ приведены на рис.4, а при выполнении условий $\frac{c}{m}<\frac{c_1}{m_1}$, $m>m_1$ – на рис.5. Анализ рис.4 и рис.5 показывает, что в точках $\omega=\sqrt{\frac{c_1}{m_1}}$ и $\omega=\sqrt{\frac{c_1+2c_0}{m_1}}$ значения амплитудно-частотных характеристик связанных осцилляторов будут одинаковыми, а в точках

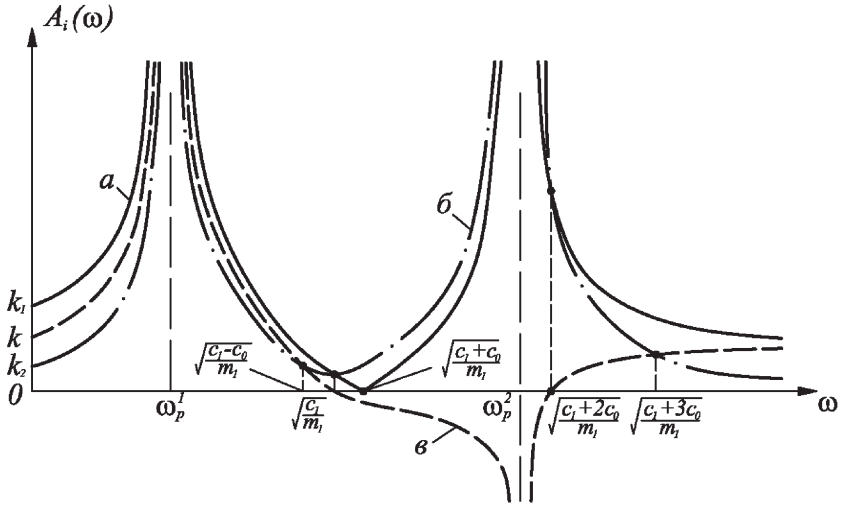


Рис.5. Амплитудно-частотные характеристики связанных колебательных систем при $W_{доп}(p)=0$, $y_1=0$, $\frac{c}{m}<\frac{c_1}{m_1}$, $m>>m_1$: а) $A_1(\omega)$; б) $A_2(\omega)$; в) $A_3(\omega)=A_1(\omega)-A_2(\omega)$,

$$k_1=\frac{c(c_0+c_1)}{(c_0+c_1)(c_0+c)-c_0^2};\ k_2=\frac{cc_0}{(c_0+c_1)(c_0+c)-c_0^2};\ k=\frac{c_1c}{(c_0+c_1)(c_0+c)-c_0^2}.$$

$\omega=\sqrt{\frac{c_1-c_0}{m_1}}$ и $\omega=\sqrt{\frac{c_1+3c_0}{m_1}}$ величина $A_1(\omega)$ будет в два раза больше величины $A_2(\omega)$.

Пусть дополнительная связь имеет передаточную функцию $W_{доп}(p)=Lp^2$, в этом случае кроме упругой связанности парциальных подсистем появляется также инерционная связанность. Согласно правилам введения дополнительных инерционных элементов параллельно упругим элементам, установленным в [3-7], определяем амплитудно-частотные характеристики системы с дополнительной инерционной связью:

$$A_1(\omega)=\left|\frac{\left(-\left(m_1+L\right)\omega^2+c_0+c_1\right)c}{\Delta(\omega^2)}\right|, \qquad (9)$$

$$A_2(\omega)=\left|\frac{\left(-L\omega^2+c_0\right)c}{\Delta(\omega^2)}\right|, \qquad (10)$$

где

$$\Delta(\omega^2)=\left(-\left(m_1+L\right)\omega^2+c_1+c_0\right)\times$$
$$\times\left(-\left(m+L\right)\omega^2+c_0+c\right)-\left(c_0-L\omega^2\right)^2.$$

Система с дополнительной инерционной связью имеет два режима резонанса ω_p^1 и ω_p^2, определяемых из уравнения:

$$\left(-\left(m_1+L\right)\omega^2+c_1+c_0\right)\left(-\left(m+L\right)\omega^2+c_0+c\right)-$$
$$-\left(c_0-L\omega^2\right)^2=0. \qquad (11)$$

Режим динамического гашения левого осциллятора будет равен парциальной частоте правого:

$$\omega_{г,1}=n_2=\sqrt{\frac{c_0+c_1}{m_1+L}}, \qquad (12)$$

частота динамического гашения правого осциллятора:

$$\omega_{г,2}=\omega_1=\sqrt{\frac{c_0}{L}}. \qquad (13)$$

Графики амплитудно-частотных характеристик (7) и (8) приведены на рис.6.

Амплитудно-частотные характеристики свидетельствуют о следующих эффектах.

1. Если частота внешней силы совпадает с одной из собственных нормальных частот системы, то наступает резонанс, и амплитуды в обоих осцилляторах неограниченно растут.

2. Если частота внешней силы, действующей на левый осциллятор, совпадает с парциальной частотой правого осциллятора, то есть $\omega=n_2$, то левый осциллятор не колеблется $x=0$, это явление называется динамическим гашением колебаний.

3. При частоте внешней силы $\omega_1 = \sqrt{\frac{c_0}{L}}$ правый осциллятор не колеблется; это явление имеет место только в том случае, если связь носит комбинированный характер, то есть имеется как упругая, так и инерционная связь ($L \neq 0$).

Определим характер зависимостей $A_1(\omega)$ и $A_2(\omega)$ в случае, когда присутствует только инерционная связанность парциальных подсистем, то есть $c_0 = 0$. «Зануляя» параметр c_0 в выражениях для амплитудно-частотных характеристик (9) и (10), имеем:

$$A'_1(\omega) = A_1(\omega)\big|_{c_0=0} = \left|\frac{\left(-\left(m_1+L\right)\omega^2 + c_1\right)c}{\Delta'(\omega^2)}\right|; \quad (14)$$

$$A'_2(\omega) = A_2(\omega)\big|_{c_0=0} = \left|\frac{-L\omega^2 c}{\Delta'(\omega^2)}\right|, \quad (15)$$

где

$$\Delta'(\omega^2) = \left(-\left(m_1+L\right)\omega^2 + c_1\right)\times$$
$$\times\left(-\left(m+L\right)\omega^2 + c\right) - \left(-L\omega^2\right)^2.$$

Графики зависимостей $A'_1(\omega)$ и $A'_2(\omega)$ изображены на рис.7 и рис.8.

Анализ приведенных зависимостей амплитудно-частотных характеристик от частоты внешнего воздействия показал, что на динамические параметры двух связанных механических колебательных систем большое влияние оказывает характер их связи. Таким образом, вводя те или иные дополнительные связи, имеющие различную форму физических реализаций, мы можем влиять на характер связанности парциальных подсистем и тем самым на динамические свойства системы в целом.

Выводы.

1. В развитии теоретических основ, введение в колебательные механические системы дополнительных связей в виде механических цепей существенным образом зависит от их вида и состава, хотя разные виды механических цепей могут иметь схожие передаточные функции. К первому классу механических цепей могут быть отнесены различные механизмы, отличительной чертой которых является то, что взаимодействие их элементов носит кинематический характер. Второй класс механических цепей представляет собой систему, состоящую из твердых тел соединенных между собой упругими, а также другими элементами, при этом взаимодействие элементов системы описывается дифференциальными уравнениями. С учетом вышесказанного, тех-

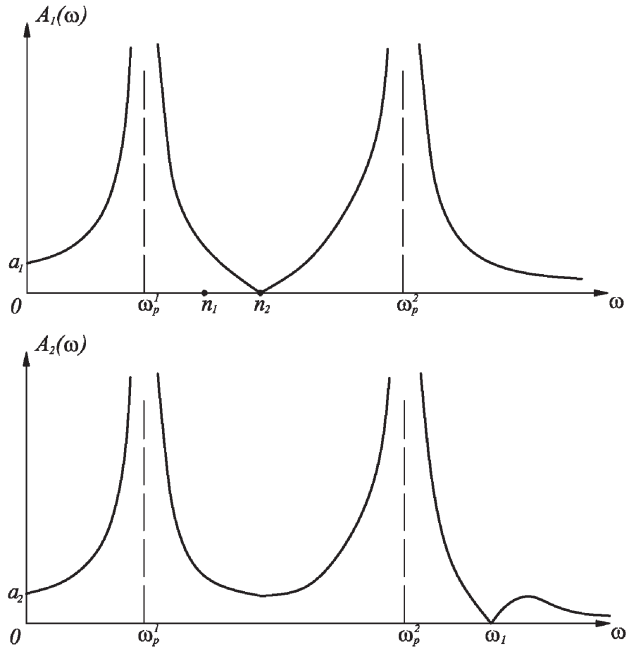


Рис.6. Амплитудно-частотные характеристики системы, изображенной на рис. 2, при $W_{доп}(p) = Lp^2$, $y_1 = 0$, $a_1 = \frac{c(c_0+c_1)}{c(c_0+c_1)+c_0c_1}$; $a_2 = \frac{c_0 c}{c(c_0+c_1)+c_0c_1}$.

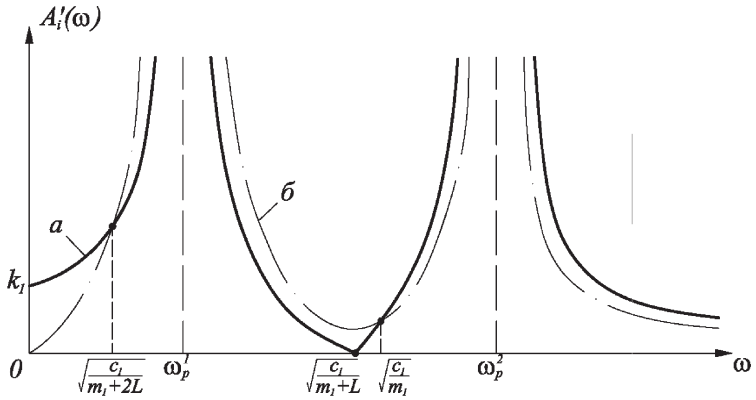


Рис.7. Амплитудно-частотные характеристики связанных колебательных систем при $W_{доп}(p) = Lp^2$, $y_1 = 0$, $\frac{c}{m} > \frac{c_1}{m_1}$, $c > c_1$: а) $A'_1(\omega)$; б) $A'_2(\omega)$, $k_1 = 1$.

нология введения дополнительных связей на структурной схеме и построение на этой основе адекватных моделей имеют свои особенности.

2. При введении в базовую модель для задач виброзащиты и виброизоляции дополнительного колебательного контура для реализации управления по относительному отклонению, при сохранении всех имеющихся правил введения соответствующих дополнительных связей на структурной схеме, формируется внутренняя динамическая связь. Эта связь с физической точки зрения отражает в процессах взаимодействия не только упругие силы, возникающие при деформации пружины, но и передачу силы инерции, создаваемую дополнительной массой. Такой эффект встречается, например, при определении величины реакции тела, опирающегося через пружину на основание. Сила веса передается на основание, а колебания, возникающие относительно положения равновесия, формируют динамическую составляющую реакции. Это обстоятельство объясняется тем, что парциальная система при таком способе связи реализует эффект передачи сил инерции, возбуждаемых движение основания.

3. При введении дополнительной связи в виде колебательного контура для реализации управления по абсолютному отклонению, упомянутые выше эффекты будут отсутствовать, так как движение основания не передается напрямую в соответствующую парциальную систему.

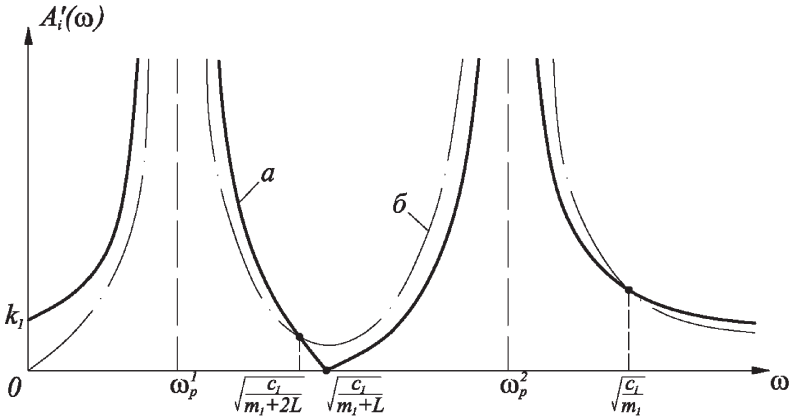


Рис.8. Амплитудно-частотные характеристики связанных колебательных систем при $W_{доп}(p) = Lp^2$, $y_1 = 0$, $\frac{c}{m} < \frac{c_1}{m_1}$, $c < c_1$: а) $A'_1(\omega)$; б) $A'_2(\omega)$, $k_1 = 1$.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Банина Н.В. Математическое моделирование виброзащитных систем с дополнительными активными связями // Вестник БГУ, серия «Математика и информатика». — Вып.3. —Улан-Удэ: БГУ,2006. — С. 197-204.
2. Гозбенко В.Е. Методы управления динамикой механических систем на основе вибрационных полей и инерционных связей. — М.: Машиностроение. 2004. 386 с.
3. Банина Н.В. Особенности структурных интерпретаций механических колебательных систем при введении дополнительных связей // Механика и процессы управления: Труды 33-го Уральского семинара. — Екатеринбург, 2003. — С. 197-208.
4. Банина Н.В. Математическое моделирование механической колебательной системы балочного типа с дополнительными связями // Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири: Сб. науч. тр. — Иркутск: БГУЭП, 2004. — С. 175-183.
5. Банина Н.В. Об учете структуры параллельной системы дополнительных связей в математических моделях задач виброзащиты и виброизоляции // Вестник ИрГТУ. — Иркутск: ИрГТУ, 2004. - №1(17). — С. 92-99.
6. Банина Н.В. Математическое моделирование двумерной механической колебательной системы с дополнительными связями // Современные технологии. Системный анализ и моделирование. — Иркутск: ИрГУПС, 2004. — №1. — С. 73-78.
7. Хоменко А.П., Банина Н.В. Введение дополнительных инерционных связей в математических моделях задач виброзащиты и виброизоляции // Современные технологии. Системный анализ и моделирование. — Иркутск: ИрГУПС. — 2004. — №3. — С. 5-9.

Белых А.В., Белоусов О.Г.

УДК 656.001

МНОГОСТУПЕНЧАТОЕ ЛАБИРИНТНО-ВИНТОВОЕ УПЛОТНЕНИЕ ВАЛА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Обеспечение сохранности материальных ресурсов является одним из главных направлений в деятельности хозяйственных субъектов. Огромный урон народному хозяйству наносят пожары. Для борьбы с этим стихийным бедствием используется подразделения Государственной Противопожарной службы. Основными техническими средствами пожаротушения являются пожарные автомобили с установленными на них одно и двухступенчатыми центробежными насосами. По многим показателям и параметрам производимые в России центробежные насосы несовершенны и уступают зарубежным аналогам прежде всего по герметичности.

Проблема герметичности имеет место во всех отраслях промышленности и касается многих устройств и машин, в том числе и пожарных. Наиболее широкое распространение в узлах валов центробежных насосов получили давно известные и простые по конструкции сальниковые уплотнения. В процессе эксплуатации происходит износ этих уплотнений, сопровождающийся выносом перекачиваемой жидкости за пределы сальниковой камеры и попаданием в подшипниковый узел центробежного насоса. Герметичность сальникового уплотнения в процессе износа снижается и требует периодического восстановления. Анализ статистической информации показывает, что средний срок службы сальниковых уплотнений центробежных насосов пожарных автомобилей не превышает 300 часов, что приводит к выводу пожарного автомобиля из боевого дежурства. Поэтому одной из важнейших технических задач является повышение герметичности и долговечности работы центробежных насосов.

При создании разнообразных образцов техники с подвижными элементами возникает необходимость решения проблемы уплотнений. В природе не существует аналогов скользящего уплотнения. Создание полной герметичности часто остается невыполнимой задачей не только из-за основополагающих физических проблем, но также и из-за требуемой экономичности и технологичности решения. Из-за разнообразия условий эксплуатации и требований к герметичности в различных отраслях машиностроения создаются многочисленные уплотнительные системы, в основном на основе торцовых уплотнений. В ряде случаев уплотнительные системы насосов являются более дорогими, чем сами насосы. Не редко затраты на ремонт в сотни или тысячи раз превышают стоимость разрушенных уплотнительных элементов. Мировая статистика катастроф показывает, какую беду может принести рискованно сконструированная уплотнительная система.

Конструирование, изготовление и эксплуатация уплотнений и уплотнительных систем требуют обширных знаний. Процессы в уплотнительных щелях определяются свойствами жидкостей и газов, теплопередачей и теплоотдачей, фазовыми изменениями, изнашиванием и коррозией, равновесием действующих на подвижные части уплотнений сил и моментов, вибрационным состоянием и т.д. Очень часто эти определяющие параметры так тесно связаны между собой, что кажется невозможным надежно рассчитать поведение уплотнительной системы в процессе эксплуатации. Но необходимо найти решение или доказать, что при предъявленных требованиях при существующем состоянии техники определенное уплотнение создать невозможно.

Основные проблемы, возникающие при создании новой техники и модернизации старой, связаны, в первую очередь, с требованиями повышения экономичности и увеличения срока их эксплуатации. Эксплуатационные параметры пожарных автомобилей и их агрегатов зависят от допустимых в них уровней давлений, температур и скоростей, пределы

которых часто определяются возможностями используемых уплотнений. В насосных установках пожарных автомобилей уплотнения работают при давлениях до 4 МПа, частоте вращения вала рабочего колеса до 6300 об • мин$^{-1}$, что увеличивает нагрузки на узлы уплотнений. Внедрение новой техники сдерживается отсутствием доведенных высокоресурсных уплотнительных узлов, которые были бы работоспособны и в более жестких условиях эксплуатации.

Ресурс уплотнительных устройств в насосных установках пожарных автомобилей влияет на их характеристики. Износ торцевых уплотнений вала рабочего колеса насоса стоит на первом месте среди причин отказов в работе насосных установок. При применении сальниковых уплотнений в насосах происходит износ вала, а утечки воды в полость подшипникового узла вызывают коррозию подшипников и их разрушение. Конструирование и применение уплотнений в насосных установках требуют учета многих факторов.

Постоянно повышающиеся требования к надежности, герметичности и массе уплотнений обусловливают интерес к торцовым уплотнениям лабиринтного или лабиринтно-винтового типа. Такие правильно спроектированные уплотнения должны работать без изнашиваемости пары трения с меньшей утечкой, чем радиально-торцовое уплотнение.

В настоящее время торцовые уплотнения являются основным классом уплотнительных устройств. Однако они конструктивно сложны и требуют специальных знаний при проектировании, изготовлении, эксплуатации. Это определяет их высокую стоимость.

В жидкостях с малой вязкостью (в воде, сжиженных газах и т. п.) более эффективны лабиринтно-винтовые уплотнения. Они состоят из статора и ротора, имеющих нарезки противоположного направления. При вращении ротора в жидкости, находящейся в пространстве между ротором и статором, возникают силы турбулентного трения, увеличивающиеся с увеличением вязкости жидкости. При соответствующем конструктивном подборе такого уплотнения можно практически полностью исключить утечки через него во время работы насоса.

На основе всестороннего анализа конструкций и видов существующих лабиринтно-винтовых уплотнений нами теоретически обоснована, разработана и реализована конструкция многоступенчатого лабиринтно-винтового уплотнения (рис. 1).

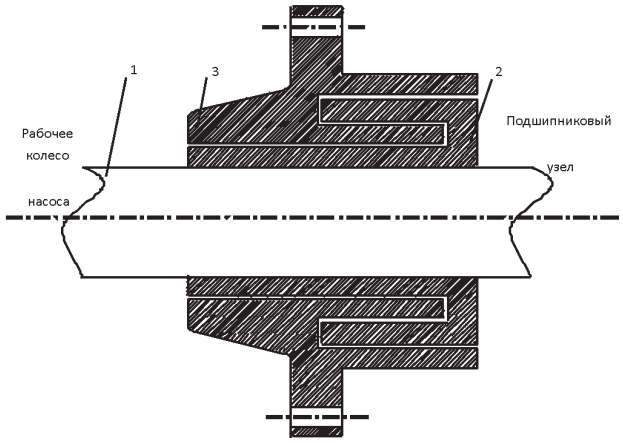


Рис.1. Трехступенчатое лабиринтно-винтовое уплотнение: 1 – вал центробежного насоса; 2 – ротор уплотнения; 3 – статор уплотнения.

Предлагаемая конструкция лабиринтно-винтового уплотнения вала центробежного насоса может быть использована в центробежных гидромашинах для герметизации подшипниковых узлов. Задачей является создание такой конструкции уплотнения, которая исключает попадание перекачиваемой жидкости в подшипниковый узел. Этим достигается технический результат, который заключается в увеличении срока службы гидромашины.

Проведем расчет предлагаемой конструкции лабиринтно-винтового уплотнения вала центробежного насоса.

В первом приближении при расчете таких уплотнений можно использовать известные зависимости, выведенные для лабиринтно-винтовых устройств, целиком заполненных жидкостью.

$$\Delta p_{T0} = \frac{kzl\rho v^2}{4\pi d}; \qquad (1)$$

$$N_{T0} = \Delta p_{T0} F_{пр} \frac{\upsilon}{2} ctg\alpha. \qquad (2)$$

где Δp_{T0} — перепад давления в уплотнении; k — коэффициент напора; z, l, d, α — число заходов, длина, диаметр и угол нарезки; x — окружная скорость; ρ — плотность жидкости;

$F_{пр}$ — площадь нарезки; N_{T0} — мощность потребляемая уплотнением.

Из (2) следует, что для снижения мощности, потребляемой уплотнением, нужно уменьшать площадь и увеличивать угол нарезки. При подобном уменьшении размеров уплотнения потребляемая им мощность снижается в пятой степени, а развиваемый напор пропорционален квадрату диаметра. Поэтому выгодно уменьшать диаметр уплотнения, компенсируя падение напора увеличением длины ротора и статора.

Из уравнения (1) имеем

$$\Delta p_{T0} \sim zl\omega^2 d,$$

откуда

$$N_{T0} \sim \omega^3 zld^2 F_{пр} ctg\,\alpha.$$

Поскольку число заходов z нарезки пропорционально диаметру d, то

$$\Delta p_{T0} \sim \omega^2 ld^2; \quad N_{T0} \sim \omega^3 ld^3 F_{пр} ctg\,\alpha.$$

Для заданного перепада давления необходимо иметь

$$ld^2 = const = C; \quad N_{T0} \sim \omega^3 CdF_{пр} ctg\,\alpha\,.$$

Потребляемая уплотнением мощность уменьшается пропорционально диаметру уплотнения. В то же время поддержание необходимого давления Δp_{T0} с уменьшением диаметра требует резкого увеличения длины $l(l \sim 1/d^2)$.

Однако увеличение длины невозможно по условиям установки уплотнения на валу насоса. Выбираем многоступенчатую конструкцию лабиринтно-винтового уплотнения.

Исходные данные *для расчета уплотнения:* среда — вода (возможно содержание солей до 40 г/л); давление воды перед уплотнением 1 МПа; температура воды до 30° С; допустимая утечка воды наружу 0 л/ч; Частота вращения вала 2700 об/мин; потребляемая насосом мощность не более 65.4 кВт; диаметр вала насоса 45 мм; длина проточной части уплотнения не более 75 мм.

При расчете лабиринтно-винтового уплотнения за исходную характеристику принимаем характеристику рабочих органов с треугольной формой нарезок, показанную на рис. 2.

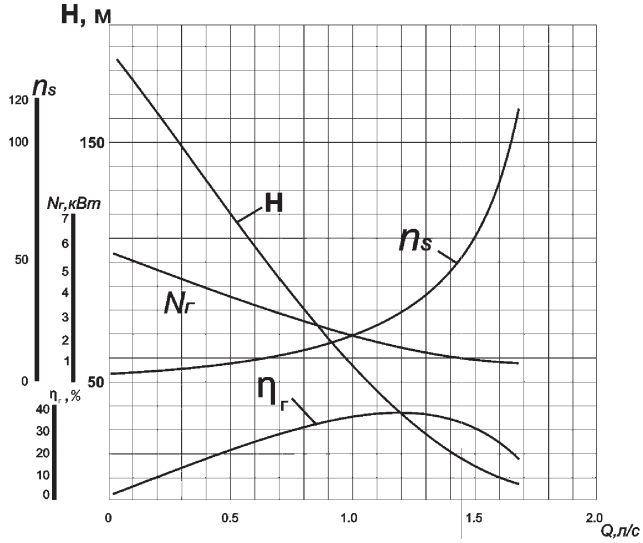


Рис.2. Характеристика рабочих органов уплотнения (n=2900 об/мин) с нарезкой треугольной формы.

Эта нарезка имеет угол $\alpha = 76°$, соответствующий области наибольших значений коэффициента напора k. По характеристике на рисунке 2 при $Q_м$=0 и $n_м$=2900 об/мин определяем $\Delta p_м$=1.8 Мпа; $N_м$=5 кВт. Размеры нарезок ротора и статора следующие: $d_м$=100 мм; $l_м$=150 мм; $s_м$=80 мм; $z_м$=27; $\delta_м$=0,65 мм; $h_м$=3,8 мм. Из условия ограниченности размеров уплотнения в осевом и радиальном направлениях принимаем трехступенчатый вариант уплотнения с длиной проточной части l=45 мм и диаметрами ступеней d_1=55 мм; d_2=70 мм и d_3=82 мм (рис. 3).

Сохраняя форму и размеры зубьев нарезок, пересчитываем по формулам подобия перепад давления и мощность на диаметр и длину третьей ступени уплотнения (d_3=82 мм; l=45 мм) и частоту вращения вала n=2700 об/мин. Учитывая, что число зубьев нарезки при этом уменьшается в отношении $d_м/d_3$, по формуле (1) получим

$$\Delta p'_м = \Delta p_м \frac{l}{l_м}\left(\frac{d_3}{d_м}\right)^2\left(\frac{n}{n_м}\right)^2 = 0.314 \;\; МПа.$$

Согласно (2) имеем

$$N'_м = N_м \cdot \frac{l}{l_м} \cdot \left(\frac{d_2}{d_м}\right)^4 \cdot \left(\frac{n}{n_м}\right)^3 = 0.547 \;\; кВт.$$

Чтобы увеличить перепад давления и уменьшить потребляемую уплотнением мощность, изменяем размеры нарезок. Сохраняя диаметры ступеней уплотнения и форму про-

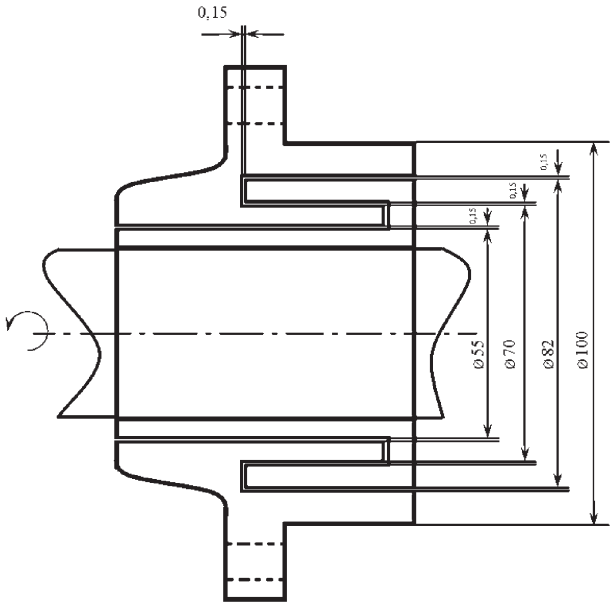


Рис.3. Схема трехступенчатого лабиринтно-винтового уплотнения.

филя нарезок, уменьшаем высоту зубьев h до 1 мм.

Из условий сборки и установки уплотнения в насосе выбираем диаметральный зазор во всех ступенях равным δ_D =0.3 мм.

С изменением h и δ изменяется коэффициент напора нарезки. Для его оценки обратимся к кривой 2 на рис. 4.

По кривой 2 (рис. 4) для $h_м$=3.8 мм $\delta_м/h_м$=0.17 этого отношения определяем $(k/k_{0.1})_м$=0,7. Соответственно для нарезки с h=1 мм и δ_D/h=0.3 находим $k/k_{0.1}$=0.3. Число зубьев z_3 нарезки третьей ступени равно 74.

Перепад давления третьей ступени

$$\Delta p_3 = \Delta p'_м \cdot \frac{z}{z'_м} \cdot \frac{\left(k/k_{0.1}\right)}{\left(k/k_{0.1}\right)_м} = 0.498 \ \ МПа.$$

Поскольку заданное давление воды перед уплотнением составляет 1 МПа, то оно практически полностью теряется на третьей ступени. Отсюда, используя (2), приближенно определяем мощность, потребляемую уплотнением:

$$N = N_м \cdot \frac{\Delta p}{\Delta p'_м} \cdot \frac{F_{пр}}{F'_{пр.м}} \approx N'_м \frac{\Delta p}{\Delta p_м} \frac{h}{h_м} = кВт.$$

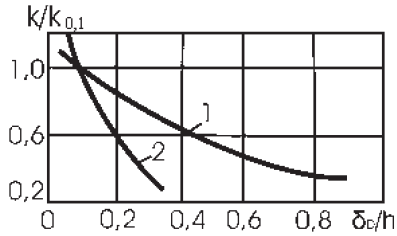


Рис.4. Зависимость коэффициента напора от относительного зазора нарезок: 1 – трапецеидальных и прямоугольных; 2 – треугольных ($k_{0,1}$ – коэффициент напора при δ_D / h=0,1).

Полученная мощность несколько меньше мощности, подсчитанной по (2) (0.547 кВт), так как при ее вычислении не учтено трение жидкости в каналах нарезок и дисковое трение.

Подсчитаем предельный перепад давления предложенной конструкции уплотнения, когда его три ступени заполнены водой. Перепады давления, воспринимаемые первой и второй ступенями:

$$\Delta p_1 = \Delta p_3 \left(\frac{d_1}{d_3}\right)^2 = 0.307 \ \ МПа;$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_3 \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^2 = 0.363 \ \ МПа.$$

Предельный перепад давления $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 \approx 1.168 \ \ МПа.$

Предлагаемая конструкция лабиринтно-винтового уплотнение вала центробежного насоса, состоящая из двух основных деталей по расчету выдерживает давление P= 1.168 МПа, что достаточно для предотвращения попадания жидкости к подшипниковому узлу.

Испытания данного уплотнения на воде показали, что перепады давления, удерживаемые ступенями без утечки наружу, значительно меньше расчетных. Особенно большая разница перепада давления получилась для третьей ступени. Это объясняется образованием водовоздушной эмульсии в зазорах ступеней уплотнения.

Во время испытаний предлагаемого уплотнения, несмотря на достаточно высокую точность центрирования ротора и статора, при давлении воды более 0,5 МПа наблюдались вибрации и задевание нарезок. Это явление было связано с радиальными гидравличес-

кими силами, действовавшими при смещениях ротора и статора.

После того как на рабочей поверхности ротора и статора были выполнены кольцевые канавки, выравнивающие распределения давления по окружности, их задевание и вибрации прекратились.

В задачу испытаний входило определение мощности, потребляемой уплотнением, предельного давления, утечки, исследование износостойкости, коррозийной и эрозионной стойкости и долговечности.

Из условий коррозийной стойкости на воде, особенно на воде с содержанием солей (например, на морской воде), в качестве материала для ротора был выбран титановый сплав марки ВТ-1. Остальные детали уплотнения были изготовлены из стали. Ресурсные испытания проводили при работе на воде. В этой среде уплотнение проработало 3005 ч. Для проверки работоспособности уплотнение испытывали при давлении 0,5 МПа — 88 ч; 0,75 МПа — 1462 ч; 1 МПа — 655 ч; 1,25 МПа — 800 ч.

При работе и на стоянке видимой утечки не наблюдалось. Отложение солей на выходе из уплотнения не было. В момент пуска и остановок при различных давлениях происходила незначительная утечка воды из уплотнений в виде мелких брызг, которая затем быстро прекращалась.

По окончании испытаний осмотр уплотнения показал, что ни коррозии, ни эрозии нарезок не произошло. Диаметральные зазоры между ротором и статором не изменились. В целом детали уплотнения были в хорошем состоянии, допускающем дальнейшее использование.

Проведенные эксперименты показали вполне удовлетворительное совпадение рассчитанных и измеренных перепадов давления на третьей ступени предложенной конструкции уплотнения. А именно: $\Delta P_{расч} = 0{,}498$ МПа, а $\Delta P_{изм} = 0{,}402$ МПа.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Белых А.В., Белоусов О.Г. Лабиринтные уплотнения как способ повышения долговечности центробежных насосов. // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 4-й международной конф. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. — С. 20-22.
2. Голубев А.И. Лабиринтно-винтовые насосы и уплотнения для агрессивных сред. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. — 112 с.
3. Патент на полезную модель № 53396 Российской Федерации. Многоступенчатое лабиринтно-винтовое уплотнение вала центробежного насоса. Белых А.В., Белоусов О.Г., Кузнецов К.А. Заявлен 30 мая 2005 г.
4. Мясковский Е. Г. Исследование лабиринтно-винтового уплотнения для вращающихся валов центробежных химических насосов. Автореф. дис. на соиск. учен, степени канд. техн. наук. М., 1965. — 18 с. (МИХМ).

Мельниченко О.В., Михальчук Н.Л., Димов А.В., Мельниченко Т.Н.

УДК 629.41

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАПРАВКИ И ДИАГНОСТИКИ БУКС С ПОСТОЯННЫМ УРОВНЕМ СМАЗКИ МОТОРНО- ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРОВОЗА

Важным элементом, определяющим надёжность электровозов серии ВЛ с опорно-осевым подвешиванием, являются буксы моторно-осевого подшипника (МОП) с постоянным уровнем смазки. В настоящее время продолжается поиск технических решений для достижения безаварийной работы МОП в эксплуатации, уменьшения трудоёмкости их обслуживания и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Для российских железных дорог разработаны стратегические направления научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года («Белая книга» ОАО «РЖД») № 964 от 31 августа 2007 года. Приоритетными задачами стали разработка и внедрение, более совершенных диагностических комплексов, энерго- и ресурсосберегающих, малоотходных, экологических технологий.

Одним из таких решений является внедрение в депо Нижнеудинск и Иркутск-Сортировочный Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД), автоматических заправочных станций (АЗС) букс моторно-осевых подшипников электровоза (рис.1), разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС), на кафедре «Электроподвижной состав» [1,2].

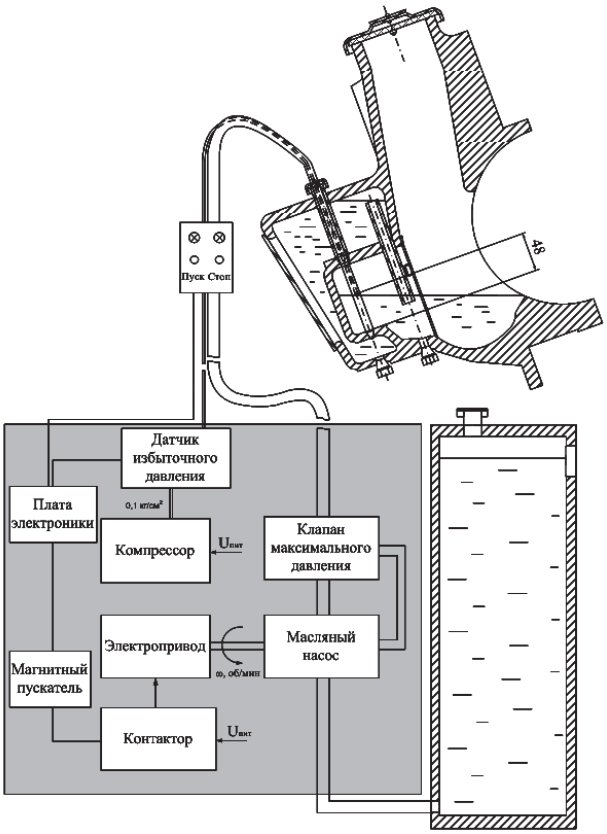
Станция производит дозированную заправку, автоматическое её выключение при заполнении буксы МОП без вытекания лишней смазки наружу и индикацию отключения системы (сигнализирует готовность следующей заправки). Повторная заправка осуществляется кратковременным нажатием кнопки «ПУСК», расположенной на заправочном пневмогидропульте.

Целью разработанной автоматической заправки букс с постоянным уровнем смазки электровоза явились следующие направления:

- повышение безопасности движения поездов;
- снижение негативного воздействия на окружающую среду;
- экономия нефтяных смазочных материалов путём исключения их розлива и потерь;
- исключение человеческого фактора при определении количества заправленной смазки;
- повышение безопасности труда персонала при обслуживании букс МОП;
- снижение загрязнения смотровых стойл депо и подъездных путей;
- уменьшение трудоёмкости при обслуживании букс МОП.

С развитием микропроцессорной техники, диагностика электрической части электровоза проводится на удовлетворительном уровне, чего нельзя сказать о механической части. Механическая часть электровоза практически не поддается диагностике, особенно при его эксплуатации. Очень важным моментом является внедрение диагностики ответственных узлов электровоза без увеличения времени технологического процесса их ремонта или осмотра, в противном случае, это может привести к увеличению эксплуатируемого парка, что может основательно повлиять на рост эксплуатационных расходов.

Повышение надёжности работы механической части электровоза, вызывает необходимость для инженерной практики получение



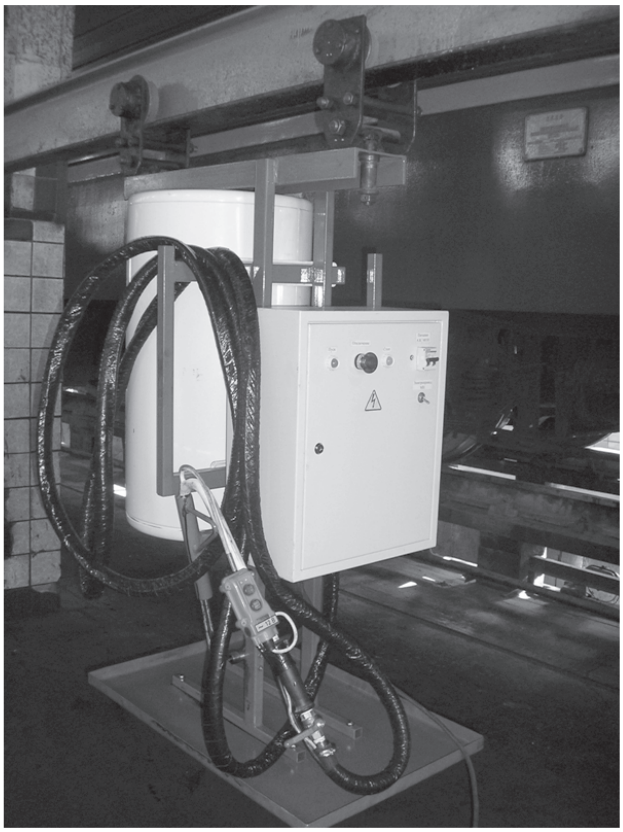


Рис.1. Автоматическая заправочная станция букс моторно-осевых подшипников электровоза.

доверительной информации, используемой в дальнейшем наукой для разработки новых принципов и методов её диагностирования.

Моторно-осевые подшипники, как одни из ответственных узлов, в немалой степени влияют на надежность работы всего электровоза. Так, если нагрев оси колесной пары вызван по причине неудовлетворительной работы МОП, возникает аварийная ситуация, которая может привести к крушению поезда.

В настоящее время разрабатывается технология по внедрению в автоматическую станцию заправки ещё и системы диагностики как самой буксы с постоянным уровнем смазки, так и моторно-осевого подшипника.

Целью диагностики букс с постоянным уровнем смазки и моторно-осевого подшипника электровоза являются следующие направления:

- диагностика технического состояния буксы МОП (излом ниппеля, загрязнение шерстяной подбивки, трещины в корпусе буксы);
- прогноз остаточного ресурса МОП;
- обеспечение учёта расхода смазочных композиций;
- автоматическое определение текущего радиального зазора МОП;
- контроль качества заправки букс МОП электровоза;
- организация мониторинга состояния букс МОП электровозов;
- исключить использование технологических отверстий для замера зазора МОП щупами вручную;
- производства заправки по состоянию букс МОП электровоза.

Все эти и выше рассмотренные направления обуславливают особую актуальность и государственную значимость описанных проблем.

Для обеспечения управления различными технологическими процессами, как правило, используются системы, разработанные на основе интеллектуальных блоков, использование которых лежит в основе создания стандартных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП).

Авторами разработки предложено на маслопровод автоматической заправочной станции установить расходомер с аналого-цифровым преобразованием сигналов, данные из ко-

торого предлагается использовать для расчета текущего радиального зазора моторно-осевого подшипника, определения текущего технического состояния буксы и прогноза на следующее техническое обслуживание (рис.2).

Технология процесса диагностики обеспечивается следующим образом:

- на начальном этапе происходит сбор данных о количестве дозаправленной смазки букс локомотивов, с одновременным измерением соответсвующего зазора МОП в соответствии с [1]. На основе полученных пар данных, строится регрессионная функция, отражающая зависимость между расходом смазки за промежуток времени от ТО-2 до ТО-2 и средней величиной зазора МОП, следующего вида:

$$\delta(V) = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + \ldots + a_n V^n, \qquad (1)$$

где V — объем дозаправленной смазки в буксу МОП; n — степень многочлена; a_0, a_1, ... a_n — параметры регрессии; δ (V) — прогнозируемая величина зазора МОП.

На персональном компьютере 22, используя метод наименьших квадратов, вычисляются коэффициенты a_0, a_1, ... a_n для различных степеней многочлена (1) n = 1..5 (рис.2). Среди построенных многочленов выбирается один, наиболее точно описывающий экспериментально полученные данные.

По данным заправок каждой буксы электровоза вычисляется радиальный зазор МОП и формируется архив данных для передачи информации на сервер, связанный с сетевой системой управления базами данных (СУБД) 23 (рис.2).

Расчет текущего зазора МОП производится по результатам накопленной статистики, отражающей зависимость между количеством заправляемой смазки и средней величиной зазора МОП. Диагностика узла МОП производится по объёму дозаправленной смазки с использованием данных о предшествующих заправках. Обеспечивается прогнозирование величины зазора МОП на следующем ТО-2. При прогнозируемой величине зазора, значительно превышающей технологический максимум 2,5 мм, производится регулировка зазора до требуемого размера.

На основе полученных ранее данных о зазорах МОП для данной буксы строится регрессионная функция, отражающая динамику изменения среднего радиального зазора, на основе которой производится прогноз значения зазора на следующем ТО-2. После обработки информации компьютером выдаётся протокол:

- дата (число, месяц, год);
- ФИО заправщика;
- серия электровоза;
- техническое состояние каждой буксы МОП;
- количество заправленной смазки, литры;
- необходимость регулировки зазора МОП, либо о продолжении эксплуатации буксы моторно-осе-

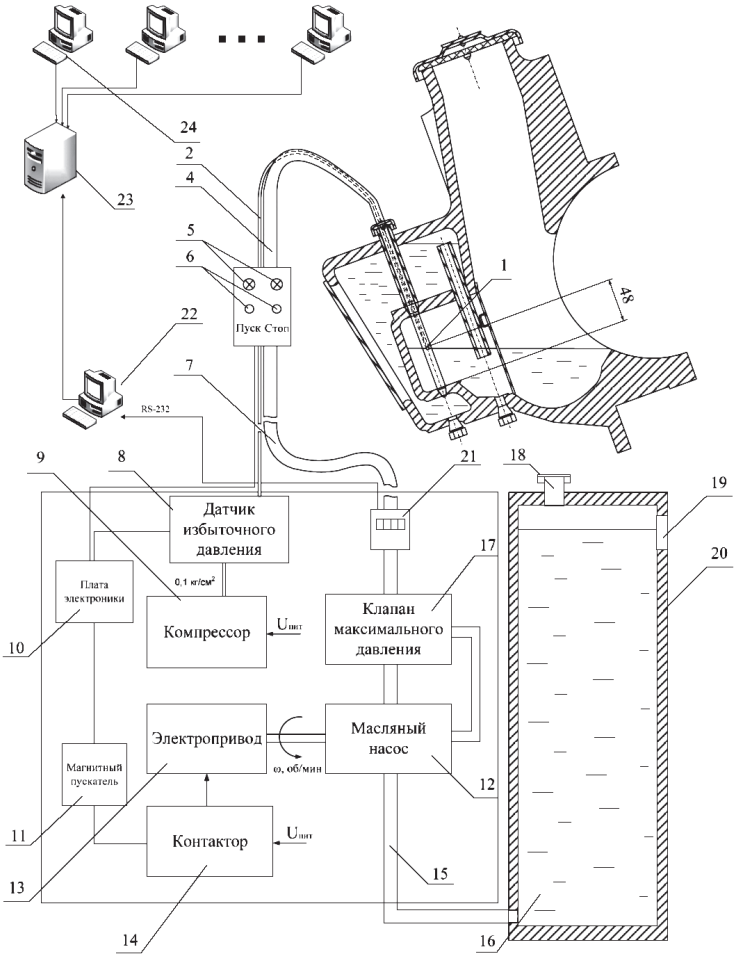


Рис.2. Комплекс автоматической заправки и диагностики букс с постоянным уровнем смазки и моторно-осевого подшипника электровоза.

вого подшипника без регулировки зазора.

В случае регулировки зазора учет дозаправок для данной буксы начинается заново. Таким же образом происходит диагностика и учет дозаправок на компьютере других депо 24, которые заносятся в сетевую СУБД 23 (рис.2).

Применение указанного способа диагностики позволит отказаться от технологических отверстий, через которые производятся замеры зазора МОП электровоза. Это снизит загрязнение рабочих камер букс МОП и увеличит их ресурс. Появляется возможность осуществлять заправку смазкой букс не на каждом ТО-2, а по состоянию на данный момент, особенно после регулирования зазора или при установке нового моторно-осевого подшипника, что позволит сократить технологическое время на обслуживание МОП и тем самым снизить трудоемкость производства работ. Кроме того, диагностика технического состояния букс МОП может производиться путём сравнения объёма дозаправленной смазки с некоторыми нормативными значениями, например, если в одну из букс заправлено значительно больше смазки, чем в другие, то делается вывод, что эта букса имеет нормативные отклонения и следует произвести её более тщательный осмотр.

Общая работа заправочного устройства осуществляется следующим образом (рис.2): при подаче питания на электропривод шестереночного масляного насоса 13, смазка 16 из бака 20 поступает в нагнетательный рукав 15 через клапан максимального давления 17 в гибкий заправочный шланг 7 и далее на маслопровод 4. От компрессора 9 по пневмопроводу 2 воздух давлением 0,1 МПа поступает к сигнальному отверстию 1. При перекрытии смазкой сигнального отверстия 1, давление воздуха в сигнальном пневмопроводе 2 мгновенно изменяется, при этом датчик избыточного давления 8, разрывает цепь катушки магнитного пускателя 11. Контактор 14 возвращается в нормальное положение, и работа двигателя привода масляного насоса 13 прекращается, что равносильно нажатию кнопки «Стоп» 6. Подача смазки прекращается, при этом загорается красный индикатор 5 на пневмогидропульте. На конце маслопровода 4, помимо сигнального отверстия 1, находится клапан 3, состоящий из пружины и шарика, который не допускает выливание остаточной смазки при прекращении работы устройства. Нормальное состояние клапана 3, при отсутствии давления смазки, закрытое. На пневмогидропульте находятся кнопки включения и отключения устройства 6, а также лампы индикации работы устройства 5.

В случае засорения маслопровода 4 клапан максимального давления 17 перекрывает доступ смазки в пневмогидропульт, и она начинает циркулировать по замкнутому контуру, избегая перегрузки в работе шестереночного масляного насоса 13.

Данные с расходомера (датчик) 21 о количестве заправленной смазки подаются по протоколу RS-232 на последовательный порт компьютера 22. На основе ранее занесенных статистических данных программа производит вычисление текущего зазора МОП и производит прогноз его величины на следующем текущем ремонте.

Заполнение смазкой заправочного бака 20 через заправочную горловину 18 происходит до уровня стеклянного окна 19. Между стенками бака 20 и емкостью со смазкой 16 находится теплоизолирующий материал для уменьшения тепловых потерь смазочного материала.

Таким образом, предлагаемая АЗС позволяет на основе полученных данных о величинах радиального зазора МОП и расходе смазки при дозаправке букс на текущем осмотре, в объеме ТО-2 или текущем ремонте (ТР) проводить парный корреляционно-регрессионный анализ.

Для отработки предлагаемой технологии диагностики и расчёта радиального зазора МОП были проведены замеры радиального зазора МОП (д, мм) и расхода смазки букс (V, л) электровозов на ТО-2. Полученные статистические данные по 614 замерам представлены в виде корреляционного поля (рис.3).

Выбор методики исследования двух количественных признаков основывается на проработке некоторых условий. Во-первых, большинство методов предполагает независимость параметров друг от друга, при этом обязательным является условие, что значение одного параметра не зависит от значений других параметров. Во-вторых, часто требуется нормальность распределения каждого признака. Необходимость проверки на нормальность распределения возникает при анализе погрешностей измерений, контроле технологических процессов. В-третьих, данные должны обладать определенной логикой своего изме-

нения: неопределенностью, дифференцируемостью, отсутствием артефактов и другими свойствами, присущими реальному физическому процессу. Поэтому данные должны быть предварительно обработаны и комплексно проанализированы. В рассматриваемом случае признаки не являются независимыми, так как между ними существует закономерность изменения, то есть при изменении значения одного показателя меняются многие другие в соответствии с физикой технологических процессов. Поэтому методикой исследования выбран метод корреляционно — регрессионного анализа. Использование этого метода позволяет оценить зависимость рассматриваемых признаков, их взаимное влияние и выявление закономерности.

Множественность результатов при анализе связи δ и V объясняется, прежде всего, тем, что зависимая переменная V испытывает влияние не только величины зазора δ, но и целого ряда других, не учитываемых в данном случае факторов. Кроме того, влияние выделенного признака V может проявляться через цепочку других факторов и т.д.

Применение корреляционного анализа наиболее приемлемо, т.к. большинство методов обладают недостатком: они не фокусируют внимание на «физике» процесса. Корреляционный же анализ позволяет дать характерную оценку технологических процессов, которая отражает влияние факторов, как внутри группы показателей, так и по отношению ко всей совокупности.

Вид корреляционного поля (рис.3) позволяет предположить, что величина δ в среднем растет с ростом V, причем можно выбрать степенную модель регрессии. Статистические расчёты проведены на основе программы Microsoft Excel. Были получены уравнения регрессии в виде полиномов до пятой степени:

$$\delta = 0{,}4455 \cdot v + 0{,}1734;$$

$$\delta = 0{,}1273 \cdot v^2 - 0{,}1196 \cdot v + 0{,}6474;$$

$$\delta = 0{,}0295 \cdot v^3 - 0{,}0673 \cdot v^2 + 0{,}2477 \cdot v + 0{,}4662;$$

$$\delta = -0{,}0138 \cdot v^4 + 0{,}153 \cdot v^3 - 0{,}4402 \cdot v^2 + 0{,}679 \cdot v + 0{,}3153;$$

$$\delta = -0{,}0142 \cdot v^5 + 0{,}148 \cdot v^4 - 0{,}525 \cdot v^3 + 0{,}837 \cdot v^2 - 0{,}3681 \cdot v + 0{,}6006.$$

В целях оценки качества регрессии, для каждого уравнения был определен коэффициент детерминации (R^2), который служит показателем качества регрессии. Известно, что чем ближе данный коэффициент к единице, тем выше качество регрессии. В данном случае значения коэффициентов детерминации ≈ 0,8, что характеризует достаточно тесную связь количественных параметров V и δ и высокое качество регрессий. Уравнения вместе с определенными коэффициентами детерминации представлены на рис.4.

Изменение коэффициента детерминации R^2 незначительно при увеличении степени полинома выше четвертой, следовательно, в качестве базового уравнения регрессии для вычисления среднего радиального зазора МОП,

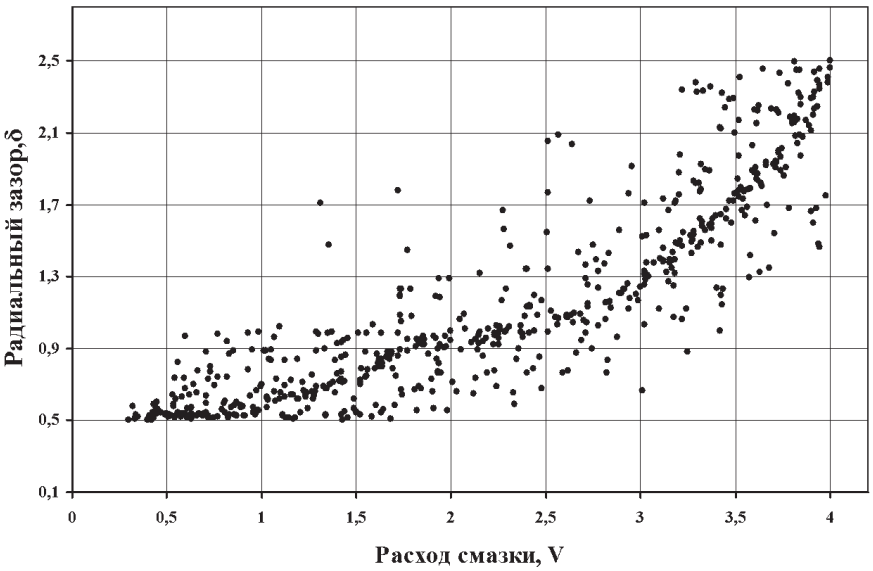


Рис.3. Корреляционное поле количественных значений расхода смазки (V, л) и радиального зазора МОП (д, мм).

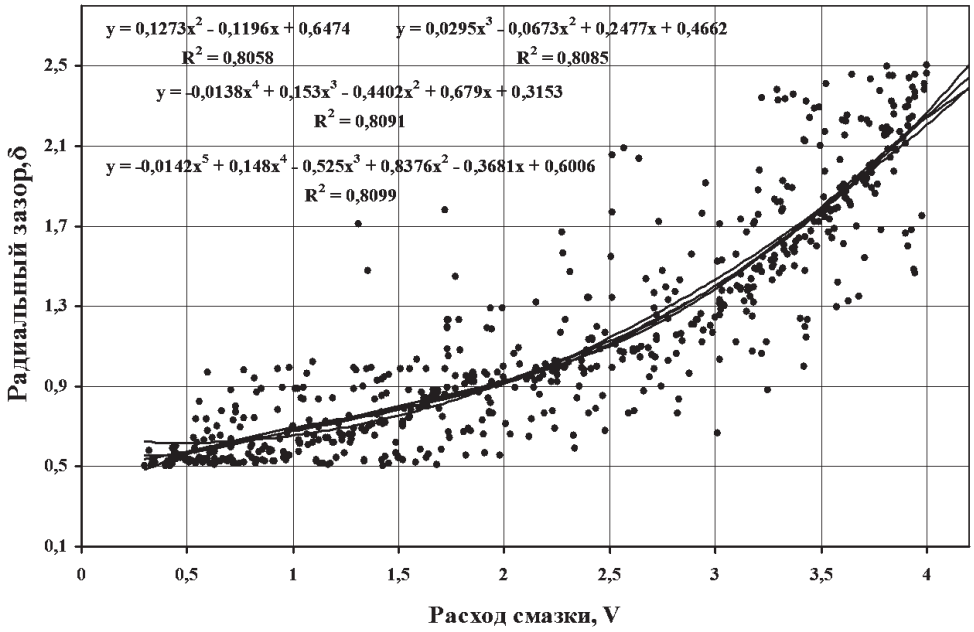


Рис.4. Корреляционно-регрессионный анализ с определением коэффициентов детерминации R^2.

можно принять полином именно четвёртой степени (рис.4).

На рис.5 представлен график отклонений результатов измерений величины зазора МОП от величин вычисленных по выбранному уравнению регрессии (остатки регрессии). Данные отранжированы по возрастанию соответствующих значений расхода смазки, и меньший разброс отклонений для первых 150 испытаний обусловлен, в первую очередь, тем, что большинство пар данных с минимальным значением расхода смазки, соответствуют измерениям после очередного регулирования зазора МОП до величины 0,5 мм, и соответственно полученные данные незначительно отклоняются от прогнозируемой величины зазора. Полученные отклонения позволяют вычислить стандартную ошибку оценки зазора МОП:

$$s = \sqrt{\frac{\sum\left(\delta_i - \bar{\delta}_x\right)^2}{n-2}} = 0{,}24 \text{ мм.}$$

Немалое влияние на зависимость между расходом смазки и средним зазором МОП оказывает средняя температура воздуха во время эксплуатации буксы. Таким образом, логичным представляется включение в модель регрессии еще одной переменной — T (температура), данные для которой представляют со-

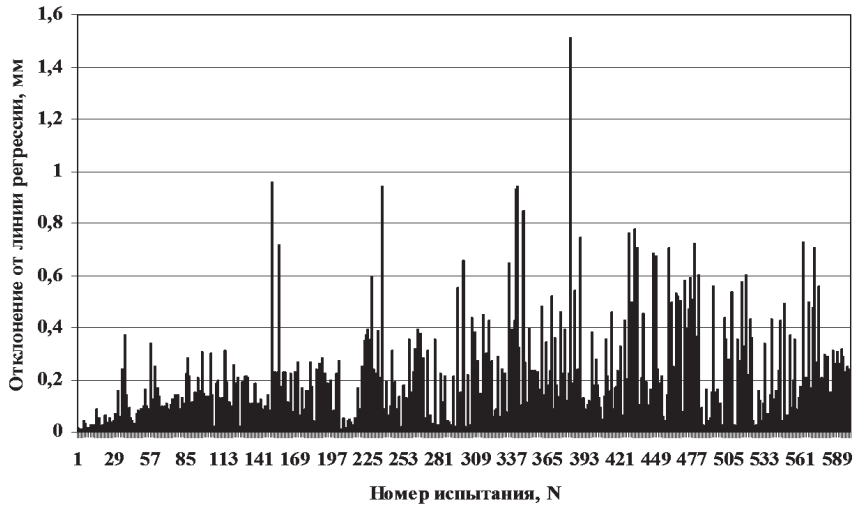


Рис.5. Отклонения (разнос ошибки) величины зазора от прогнозируемого предлагаемым способом.

бой среднюю температуру по участку, на котором эксплуатировалась текущая букса за прошедшие время с последнего ТО-2. Качество регрессии при включении дополнительной переменной, как известно, может лишь улучшится.

В качестве модели множественной регрессии выбрана линейная модель:

$$\bar{\delta}_{v,t} = a_1 V + a_2 T + b,$$

где $\bar{\delta}_{v,t}$ — среднее значение зазора буксы МОП, соответствующее значениям T = t, V = v; V — расход смазки буксой МОП на предыдущем участке; T — средняя температура за время эксплуатации; a_1, a_2, b - параметры регрессии.

Для получения данных о текущем зазоре и расходе смазки были собраны приблизительные сведения о средней температуре во время их замера по данным прогноза погоды.

Методом наименьших квадратов были получены оценки параметров регрессии:

$$a_1^* = 0{,}409;\ a_2^* = -0{,}0022;\ b^* = 0{,}224{,}1$$

уравнение регрессии при этом имеет следующий вид:

$$\bar{\delta}_{v,t} = 0{,}409 \cdot v - 0{,}0022 \cdot t + 0{,}224.$$

Анализируя полученное уравнение регрессии, можно сделать вывод о том, что увеличение средней температуры во время эксплуатации буксы на 1 °С, при фиксированном уровне расхода смазки, влечет за собой уменьшение прогнозируемого зазора МОП в среднем на 0,0022 мм, а увеличение расхода смазки на 1 литр, увеличивает прогнозируемый зазор в среднем на 0,409 мм. На рис. 6 представлен график полученной зависимости.

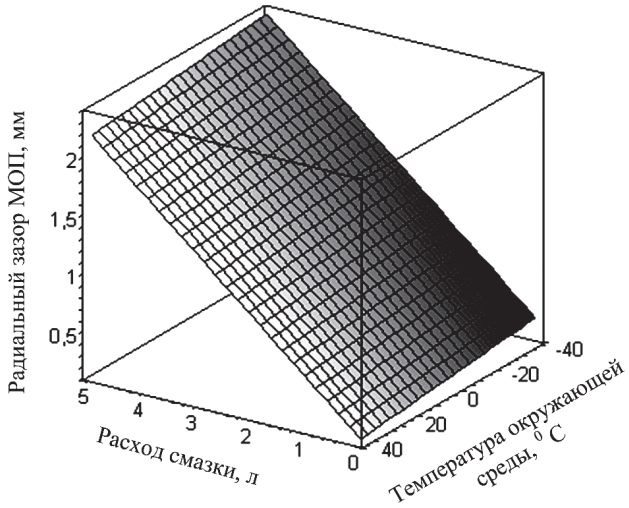


Рис. 6. Зависимость среднего значения зазора от расхода смазки и средней температуры.

Результаты множественного корреляционно-регрессионного анализа сведены в табл. 1. Ввиду того, что в качестве модели множественной регрессии выбрана линейная модель, то сравнивать полученные результаты корректнее всего будет так же с линейной моделью парной регрессии. Очевидно улучшение качества регрессии по сравнению с мо-

Табл. 1.

Результаты множественного корреляционно-регрессионного анализа.

Регрессионная статистика	
Наблюдения	614
Множественный коэффициент корреляции	0,965045566
Коэффициент детерминации	0,931312945
Стандартная ошибка	0,094715298
Оценка значимости регрессии	
F-статистика	40,47297059
t-статистика для расхода	48,50543046
t-статистика для температуры	- 6,352926579

делью парной линейной регрессии, за счет более высоких коэффициентов корреляции и детерминации. Кроме того, для оценки качества полученной модели применялись критерии Стьюдента (t-тест) и Фишера (F-тест). Результаты t-теста говорят о значимости обоих выбранных параметров (расход и средняя температура), а значение F-статистики и коэффициента детерминации — о значимости регрессии в целом и высоком ее качестве.

Очевидно, что выбор линейной модели несколько упрощает полученные результаты, особенно учитывая, что данные, собранные в процессе работы, свидетельствуют скорее о нелинейном характере зависимости среднего значения зазора от выбранных параметров. Тем не менее, полученные результаты позволяют достаточно точно оценить динамику развития радиального зазора МОП по рассмотренным параметрам и при необходимости, используя описанную методику, можно легко перейти к рассмотрению и нелинейных моделей.

Таким образом, было определено, что между радиальным зазором МОП и расходом объема смазки буксы существует тесная связь, которая позволит в дальнейшем при каждой дозаправке букс автоматически определять радиальный зазор МОП, используя автоматизированную заправочную станцию. На основании этого появляется возможность не только контролировать зазор МОП, но и производить диагностику узла, прогнозировать остаточный ресурс с организацией его мониторинга.

При использовании предлагаемого устройства снижается трудоемкость процесса заправки букс МОП. Устройство обслуживается одним человеком. Производимый расчет зазора ПЭВМ позволяет исключить использование технологических отверстий для замера зазора МОП вручную щупами. Осуществлять оперативный контроль над размером зазора, выдавать решения о необходимости регулировки зазора или выносить предупреждение о скором превышение размера зазора величины технологического максимума 2,5 мм. Исключаются случаи как недостаточной, так и избыточной подачи смазки в узлы трения за счет контроля уровня смазки в буксе. Уменьшаются загрязнения смотровых стойл, подъездных путей, окружающей среды.

Способ оперативной заправки МОП с автоматическим контролем зазора и диагностикой позволит в целом снизить время технического обслуживания (ТО-2) локомотивов, что повысит пропускную способность ремонтных стойл в локомотивном депо.

Применение передовых технологий в области измерений, контроля, обработки информации и телекоммуникаций создает базу для развития новых перспективных способов диагностики, как электрической части электровоза, так и механической.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Автоматизированная заправочная станция букс моторно-осевых подшипников электровозов [Текст]: патент № 60052, Рос. Федерация: МПК В 61 F 17/00/ Мельниченко О.В.; заявитель и патентообладатель Иркутский гос-ый ун-т путей сообщения. — № 2005130905/22; заявл. 05.10.05; опубл. 10.01.2007 Бюл. №1 — 3 с.: ил.
2. Мобильная автоматизированная заправочная станция букс моторно-осевых подшипников электровозов [Текст]: патент № 68446, Рос. Федерация: МПК B61F 17/00/ Мельниченко О.В.; заявитель и патентообладатель Иркутский гос-ый ун-т путей сообщения. — №2006145316/22; заявл. 19.12.06; опубл. 27.11.2007 Бюл. №33 — 3 с.: ил.

Шаманов В.И., Трофимов Ю.А.

УДК 656.259.21:621.351

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТЯГОВОГО ТОКА В РЕЛЬСАХ ПОД КАТУШКАМИ АЛСН

Неустойчивая работа локомотивных устройств автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН) отрицательно влияет на безопасность и бесперебойность движения поездов, увеличивает психофизиологическую нагрузку на машинистов. Количество сбоев АЛСН на ряде участков железных дорог страны в последние годы увеличивается. Анализ причин этих сбоев даже при наличии автоматически записываемой информации устройствами КЛУБ и САУТ-ЦМ весьма затруднен из-за большого количества факторов, влияющих на устойчивость работы АЛСН и изменяющихся стохастически как по мере движения поезда, так и во времени по участкам пути. Последнее обстоятельство затрудняет также интерпретацию осциллограмм, записываемых при исследованиях помех цифровыми многоканальными запоминающими осциллографами на электровозах в процессе ведения поездов. Поэтому математическое моделирование, с использованием компьютеров, физических процессов растекания переменных тяговых токов электровозов по обратной тяговой рельсовой сети оказывается весьма плодотворным при исследовании влияния этих токов на устойчивость работы АЛСН.

Обратная тяговая рельсовая сеть, по которой тяговые токи возвращаются на тяговые подстанции, представляют собою сложную электрическую сеть с распределенными параметрами. При моделировании использована схема замещения обратной тяговой рельсовой сети при неоднородных линиях, разработанная в работе [1].

Основную роль в распределении тягового тока электровоза под приемными локомотивными катушками АЛСН играют входные сопротивления рельсовых нитей, расположенных перед электровозом. Можно считать, что земля и точка соединения секций основной обмотки ближайшего спереди к электровозу дроссель-трансформатора, установленного около изолирующих стыков, эквивалентны по отношению к удаленной земле. Тогда при изучении процессов растекания тяговых токов перед электровозом по обратной рельсовой тяговой сети можно использовать модель, показанную на рис. 1. Эта модель характерна для наиболее интересных участков обратной тяговой рельсовой сети, где тяговые токи в рельсах имеют максимальные значения. Вследствие этого интенсивности сбоев АЛСН и отказов рельсовых цепей из-за влияния этих токов тоже максимальны:

— для перегонов с бесстыковыми рельсовыми цепями (РЦ), когда отсасывающая линия тяговой подстанции подключена к средней точке дроссель-трансформатора, установленного на границе перегона со станцией;

— для перегонных рельсовых цепей кодовой автоблокировки и для станционных рельсовых цепей, когда отсасывающая линия тяговой подстанции подключена тоже к средней точке дроссель-трансформатора, установленного на выходном конце рельсовой цепи.

В схеме приняты следующие условные обозначения:

$Z_{ДТ}$ — сопротивления секций основных обмоток дроссель-трансформаторов;

$Z_{ДР1}$, $Z_{ДР2}$ — сопротивления дроссельных перемычек;

$Z'_{11}, Z'_{12}, Z'_{13}, \ldots, Z'_{1n}$ — сопротивления отрезков выбранной длины в левой по ходу электровоза рельсовой нити РН1, лежащей перед ним;

$Z''_{11}, Z''_{12}, Z''_{13}, \ldots, Z''_{1n}$ — сопротивления цепи «рельс - земля» для отрезков выбранной длины в левой по ходу электровоза рельсовой нити РН1, лежащей перед ним;

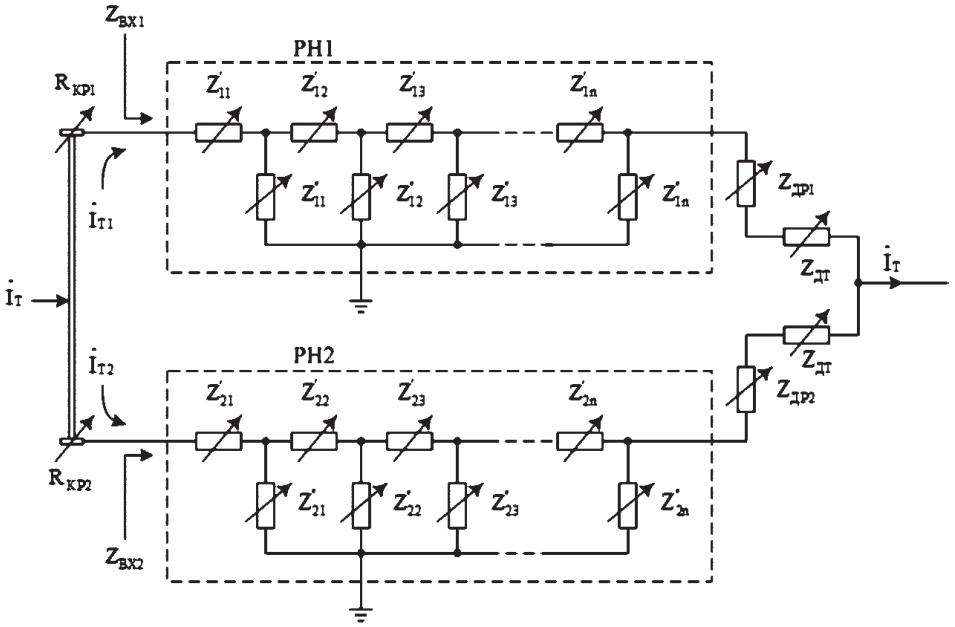


Рис.1. Модель обратной тяговой рельсовой сети для определения.

Z'_{21}, Z'_{22}, Z'_{23}, ... , Z'_{2n} — сопротивления отрезков выбранной длины в правой по ходу электровоза рельсовой нити РН2, лежащей перед ним;

Z''_{21}, Z''_{22}, Z''_{23}, ...,Z''_{2n} — сопротивления цепи «рельс - земля» для отрезков выбранной длины в правой по ходу электровоза рельсовой нити РН2, лежащей перед ним;

$Z_{ВХ1}$ — входное сопротивление левой по ходу электровоза рельсовой нити РН1;

$Z_{ВХ2}$ — входное сопротивление правой по ходу электровоза рельсовой нити РН2;

$R_{КР1}$ — сопротивление перехода у первой колесной пары электровоза «левое колесо — рельс»;

$R_{КР2}$ — сопротивление перехода у первой колесной пары электровоза «правое колесо - рельс»;

$\dot{I}_T$ — тяговый ток электровоза;

$\dot{I}_{T1}$ — тяговый ток электровоза, протекающий под катушкой АЛСН по левой рельсовой нити;

$\dot{I}_{T2}$ — тяговый ток электровоза, протекающий под катушкой АЛСН по правой рельсовой нити.

В такой модели рельсовые нити удобно представлять цепными (лестничными) схемами. Тогда входное сопротивление, например, рельсовой нити РН1 с учетом [1] можно вычислять по формуле:

$$Z_{BX1} = Z'_{14} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{Z''_{14}} + \cfrac{1}{Z'_{15} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{Z''_{15}} + \cfrac{1}{Z'_{16} + \cfrac{1}{Z''_{16}} + \cfrac{1}{Z_{ДР12} + Z_{ДТ}}}}}}. \quad (1)$$

Длина дроби (1) при выбранной длине отрезков рельсовых нитей определяется длиной рельсовой линии, на которой переменный обратный тяговый ток почти полностью стекает в землю (до 95% от тягового тока электровоза, втекающего в эту рельсовую нить). При моделировании использована длина отрезка рельсовой нити, равная 50 метров, в соответствии со средним расстоянием между контактными опорами.

Найдя значения входных сопротивлений рельсовых нитей, длина которых изменяется по мере движения поезда к выходному концу рельсовой цепи, можно рассчитать распределение обратного тягового тока под катушками АЛСН по формулам:

$$\dot{I}_{T1} = \dot{I}_T \cdot \frac{Z_{BX2}}{Z_{BX1} + Z_{BX2}}; \; \dot{I}_T \cdot \frac{Z_{BX1}}{Z_{BX1} + Z_{BX2}}. \quad (2)$$

В реальных условиях продольные и поперечные сопротивления рельсовых нитей изменяются в широких пределах. Продольное сопротивление изменяется из-за старения или обрыва стыковых соединителей, различия в длине дроссельных перемычек и изменения во времени переходных сопротивлений в месте крепления этих перемычек к рельсам и выводам дроссель-трансформаторов. Попереч-

ное сопротивление изменяется вследствие понижения сопротивления цепей заземления опор контактной сети или появления неисправностей в искровых промежутках. Следовательно, в общем случае сопротивление рельсовой линии неоднородно по её длине. В результате при движении электровоза происходит динамическое перераспределение входных сопротивлений рельсовых нитей, расположенных между первой колесной парой электровоза и секциями основной обмотки дроссель-трансформатора, установленного возле изолирующих стыков, ограничивающих рельсовые цепи на станциях или на перегонах.

Удельное сопротивление одной рельсовой нити переменному тяговому току частотой 50 Гц с учетом ее внешней и внутренней индуктивности, а также сопротивлений рельсовых соединителей для рельсов типа Р65 взято при моделировании равным Ом/км [2]. Минимальное удельное сопротивление переходов "рельсовая нить — земля" принято равным 0,5 Ом•км, а максимальное - 18 Ом•км.

Модуль полного сопротивления основной обмотки переменному току частотой 50 Гц при напряжении 0,5 В у дроссель-трансформаторов типа ДТ-1-150 и ДТ-1-300 имеет величину не менее 1,0 Ом. Активное сопротивление этой обмотки не превышает 0,0035 ±10% Ом при температуре $+20\,^0$С у дроссель-трансформаторов типа ДТ-1-150 и 0,0016 ±10% Ом — у дроссель-трансформаторов типа ДТ-1-300 [3]. Следовательно, полное сопротивление основной обмотки составляет $1{,}0\cdot e^{j\,89^0 45'}$ Ом для ДТ-1-150 и $1{,}0\cdot e^{j\,89^0 55'}$ Ом для ДТ-1-300. При моделировании сопротивление основных обмоток этих дроссель-трансформаторов принято чисто индуктивным с $\varphi = 90^0$.

Моделирование проводилось при четырех значениях коэффициента продольной асимметрии сопротивления рельсовой линии $k_a^{пр}$, равных 0,0%, 2,56%, 5,88% и 7,87%. Модули удельных сопротивлений рельсовых нитей рельсовой линии принимались при этом одинаковыми по 0,78 Ом/км или разными - для одной рельсовой нити 0,80 Ом/км и для другой рельсовой нити 0,76 Ом/км, затем соответственно 0,85 Ом/км и 0,76 Ом/км; 0,89 Ом/км и 0,76 Ом/км.

Поперечная асимметрия входных сопротивлений рельсовых нитей по отношению к земле возникает на участках, где цепи заземления опор контактной сети и других конструкций подключаются к рельсам. Входное сопротивление таких цепей может уменьшаться до величины 5 Ом. На участках с железобетонными шпалами поперечная асимметрия может быть следствием повышенной односторонней утечки электрического тока через неисправные элементы крепления рельсов к шпалам.

Моделирование проводилось для трех вариантов: когда все входные сопротивления цепей заземления равны по 100 Ом, все эти сопротивления равны по 80 Ом или когда отсутствуют подключаемые к рельсам заземления. Этому соответствуют следующие значения коэффициента поперечной асимметрии рельсовой линии $k_a^{пп}$: 4,76% и 5,88%, 0%.

На участках с электрической тягой максимальная длина перегонной рельсовой цепи может быть равна 2,5 км, а станционной 1,35 км. Наиболее вероятная длина перегонных рельсовых цепей на таких участках — 1,5 км. На горных участках на подъемах средняя длина рельсовой цепи может быть в пределах — 1,0 км. При моделировании максимальная длина была принята равной 2,5 км.

На рис. 2 приведен общий вид полученного по результатам моделирования графика изменения коэффициента асимметрии переменного тягового тока под катушками АЛСН по мере движения электровоза по рельсовой цепи к нулевой точке. На графике приняты следующие условные обозначения:

$l_{рц}$ — длина рельсовой цепи, км;

l_{max} — расстояние от нулевой точки до точки, где коэффициент асимметрии принимает максимальное значение $K_{амах}$, км;

$l_{0,1}$ — расстояние, равное 100 метров от выходного конца РЦ;

$l_{уст}$ — расстояние от нулевой точки до точки, где величина коэффициента асимметрии перестает изменяться (устанавливается неизменное значение коэффициента асимметрии тягового тока $K_{аust}$);

$K_{аust}$ — установившееся (не изменяющееся) значение коэффициента асимметрии тягового тока;

$K_{a2,5}$ — коэффициент асимметрии тягового тока на расстоянии 2,5 км от выходного конца рельсовой цепи;

$K_{a0,1}$ — коэффициент асимметрии тягового тока на расстоянии 100 м от нулевой точки.

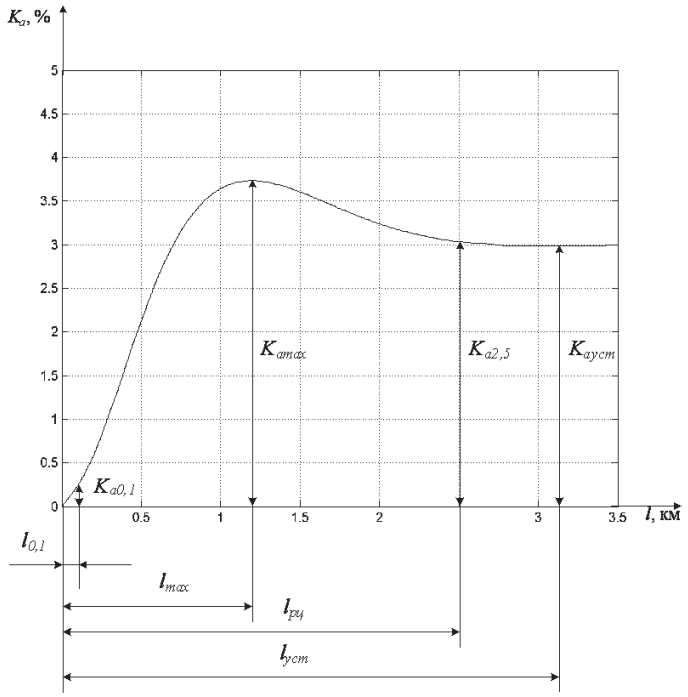


Рис.2. Изменение коэффициента асимметрии тягового тока под катушками АЛСН в рельсовых цепях с изолирующими стыками.

Коэффициент асимметрии $K_{a0,1}$ рассматривается отдельно, так как он интересен для коротких РЦ.

Некоторые наиболее характерные результаты моделирования сведены в табл. 1, откуда видно, что при отсутствии продольной асимметрии установившееся значение коэффициента асимметрии тягового тока $K_{aуст}$ при $k_a^{пп} = const$ практически не зависит от величины удельного сопротивления переходов «рельс-земля» $r_{рз}$. Однако с ростом этого сопротивления от минимума до максимальной величины длина $l_{уст}$ растет в 3 раза. Коэффициенты $K_{a2,5}$ и K_{amax} растут с ростом коэффициента поперечной асимметрии рельсовой линии. При отсутствии поперечной асимметрии рост продольной асимметрии сопротивления рельсовой линии вызывает рост всех видов учитываемых коэффициентов асимметрии тягового тока при неизменных сопротивлениях $r_{рз}$.

Анализ данных моделирования показывает, что коэффициент асимметрии тягового тока в начале РЦ длиной 2,5 км практически не зависит от вида асимметрии рельсовой линии. Коэффициент асимметрии $K_{a0,1}$ в 100 метрах от выходного конца РЦ зависит в основном от величины продольной асимметрии рельсовой линии. Максимальное значение коэффициента асимметрии тягового тока K_{amax} сильнее зависит от поперечной асимметрии рельсовой линии. С ростом сопротивления «рельс-земля» $r_{рз}$ расстояние l_{max} тоже растет, поэтому при больших значениях этого сопротивления величина K_{amax} оказывается за пределом выбранной длины рельсовой цепи. Следовательно, максимальное значение K_{amax} сказывается на устойчивости работы АЛСН только при невысоких значениях сопротивления переходов $r_{рз}$.

Для более наглядного представления результатов моделирования на рис. 3 и рис. 4 показаны построенные по результатам моделирования графики изменения по длине рельсовой цепи величины коэффициента асимметрии переменного тягового тока K_a под катушками АЛСН.

Моделирование для случаев, когда в рельсовой линии есть только поперечная асимметрия сопротивлений показало следующее. По мере движения поезда по рельсовой цепи при сопротивлении переходов "рельс - земля" $r_{рз}$ = 0,5 Ом·км коэффициент асимметрии тягового тока K_a растет до тех пор, пока поезд не пройдет точку на расстоянии 1,2 км от выходного конца рельсовой цепи (рис. 3, а). В зимний период, когда $r_{рз}$ = 18 Ом·км, поперечная асимметрия сопротивлений рельсовой линии мало влияет на устойчивость работы АЛСН.

Если рельсовая линия обладает только продольной асимметрией сопротивления такой же величины (рис. 3, б), то эта асимметрия сильнее влияет на устойчивость работы АЛСН в зимний период, причем в начале рельсовой цепи длиной 2,5 км коэффициент асимметрии K_a при этом почти в 1,5 раза больше, чем в наихудших условиях при наличии только поперечной асимметрии. С уменьшением сопротивления перехода "рельс - земля" коэффициент K_a асимметрии тягового тока уменьшается вследствие выравнивающего действия от сопротивления изоляции рельсовой линии.

При наличии и продольной, и поперечной асимметрии рельсовой линии приходится рассматривать два варианта:

— когда больше продольное сопротивление рельсовой нити, к которой подключаются

Табл. 1.

Параметры кривой изменения коэффициента асимметрии тягового тока под катушками АЛСН по длине рельсовой линии до 2,5 км.

$r_{рз}$, Ом • км	$k_a^{пр}$, %	$k_a^{пп}$, %	$K_{a0,1}$, %	K_{amax}, %	$K_{a2,5}$, %	$K_{aуст}$, %	l_{max}, км	$l_{уст}$, км
0,5	0	4,76	0,14	2,89	2,34	2,32	1,20	6,35
		5,88	0,17	3,57	2,89	2,87	1,20	6,50
18,0		4,76	0,00	2,74	0,24	2,36	10,85	20,00
		5,88	0,00	3,38	0,30	2,92	10,80	20,00
0,5	2,56	0,00	0,48	1,33	1,31	1,31	3,05	6,25
		4,76	0,62	3,98	3,66	3,64	1,30	6,05
		5,88	0,65	4,66	4,21	4,28	1,30	6,35
18,0		0,00	0,48	1,98	1,96	1,29	2,95	20,00
		4,76	0,48	3,84	2,20	3,65	10,90	20,00
		5,88	0,48	4,49	2,26	4,21	10,80	20,00
0,5	5,88	0,00	1,07	2,89	2,86	2,82	3,00	6,55
		5,88	1,25	5,97	5,76	5,73	1,40	6,75
18,0		0,00	1,08	4,32	4,29	2,82	2,90	20,00
		5,88	1,08	5,79	4,59	5,73	10,80	20,00
0,5	7,87	0,00	1,54	4,08	4,05	4,04	3,00	7,35
		4,76	1,68	6,39	6,39	6,36	2,20	5,70
		5,88	1,72	7,00	6,93	6,91	1,55	5,50
18,0		0,00	1,55	6,10	6,07	3,98	2,85	20,00
		4,76	1,55	6,60	6,31	6,34	4,25	20,00

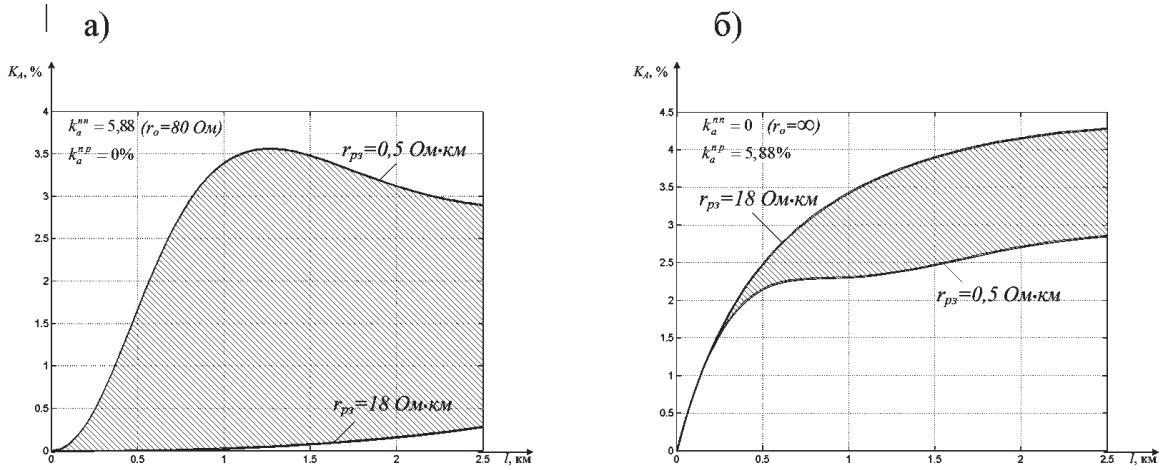


Рис.3. Изменение коэффициента асимметрии рельсовой линии по длине РЦ при наличии только поперечной (а) или только продольной (б) асимметрии сопротивлений рельсовой линии.

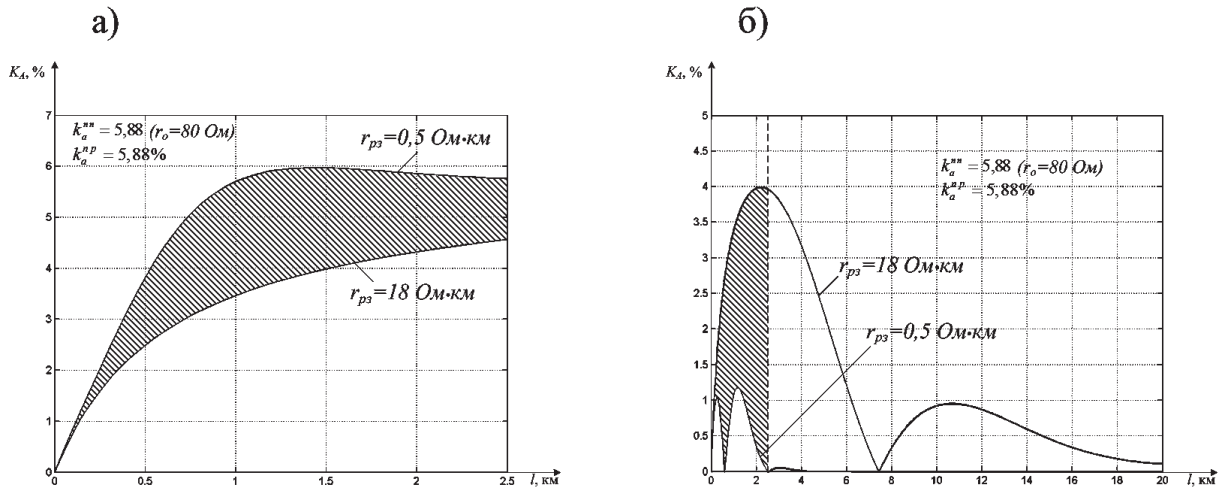


Рис.4. Изменение асимметрии тягового тока по длине рельсовой линии, когда больше продольное сопротивление рельсовой нити, к рельсам которой подключены цепи заземления конструкций (а) или когда это сопротивление больше у другой рельсовой нити (б).

цепи заземления различных конструкций (рис. 4, а);

— когда больше продольное сопротивление у другой рельсовой нити (рис. 4, б).

В первом случае коэффициент асимметрии тягового тока в начале рельсовой цепи длиной 2,5 км растет в 2 раза при $r_{рз}$ = 0,5 Ом • км и растет в 15 раз в зимний при $r_{рз}$ = 18 Ом • км по сравнению со случаем, когда есть только поперечная асимметрия такой же величины. Следовательно, это наиболее тяжелый режим для работы АЛСН.

Во втором случае картина заметно сложнее (рис. 4, б), так как возникает эффект уравновешивания асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. В результате при минимальном значении сопротивления перехода "рельс - земля" вначале на коэффициент асимметрии тягового тока K_a действует в основном продольная асимметрия сопротивлений рельсовых нитей. Затем, после точки взаимной компенсации действий продольной и поперечной асимметрий рассматриваемых сопротивлений, в которой K_a=0, начинает больше сказываться влияние поперечной асимметрии до длины, близкой к 2,5 км. На более дальних расстояниях от нулевой точки коэффициент асимметрии тягового тока K_a остается близким к нулю.

В зимний период резко усиливается действие продольной асимметрии рельсовой линии, поэтому максимум коэффициента асимметрии тягового тока K_a при $r_{рз}$ = 18 Ом • км находится вблизи начала рельсовой цепи рельсовой цепи длиной 2,5 км. Точка взаимной компенсации продольной и поперечной асимметрии при этом отодвигается на расстояние порядка 7 км от нулевой точки.

Таким образом, по результатам моделирования найдены количественные зависимости изменения коэффициента асимметрии переменного тягового тока в рельсах под катушками АЛСН по мере движения поезда по рельсовой цепи, ограниченной изолирующими стыками, для наиболее характерных вариантов сочетания продольной и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей при максимальных и минимальных значениях их сопротивлений по отношению к земле.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Шаманов В.И. Помехи и помехоустойчивость автоматической локомотивной сигнализации. — Иркутск: ИрГУПС, 2005. — 236 с.
2. Нормы технологического проектирования устройств на федеральном железнодорожном транспорте. НТП СЦБ/МПС — 99. — СПб.: Гипротранссигналсвязь, 1999. - 76 с.
3. Сороко В.И., Розенберг Е.Н. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник: Кн. 2. — М.: НПФ «ПЛАНЕТА», 2000. — 1008 с.

Белокобыльский С.В., Кашуба В.Б.

УДК 622.3.002.5-752

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ РАБОЧЕГО БЛОКА И КОРПУСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ВИБРАЦИОННОГО ЗАГЛАЖИВАНИЯ БЕТОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, анализ и сравнительный обзор результатов показывают сложную картину динамического взаимодействия рабочего органа с бетонной поверхностью. Вместе с тем рабочий орган представляет собой лишь фрагмент рабочего блока, который обеспечивает сложное движение как сумму вращательных и поступательных движений, осуществляемых приводными системами технологической машины. Реальные неточности изготовления передач, люфты и зоны нечувствительности в передачах вращения, шарнирных соединениях, упругость уплотнений формируют, как показано в работах [1-5], интегральные упругие характеристики контактного взаимодействия, представляющие собой периодические колебания сложного вида с частотным составом, содержащим как низкочастотные компоненты, так и высокочастотные, вплоть до ультразвукового диапазона.

Если рабочий блок будет иметь несколько рабочих органов, то картина взаимодействия будет усложняться, что потребует обязательного ограничения параметров динамического состояния рабочего блока, упруго закрепленного в конструкции машины. Последнее является неизбежным фактором практически любой формы практической инженерно-технической реализации (консоли, передачи, уплотнения и т.д.).

Чаще всего (и проще) желаемые изменения динамического состояния, уменьшение влияния низкочастотных гармоник интегрального возмущения достигается доступными средствами виброзащиты и виброизоляции, в частности, путем установки динамических корректоров [4] или динамических гасителей. На экспериментальной установке, использованной авторами, рабочий блок состоит из одной головки [3], что упрощает оценку возможного ограничения вибрационного фона.

1.Обоснование и выбор математической модели рабочего блока заглаживающей машины.

Расчетная схема рабочего органа заглаживающей машины представляет собой пространственную колебательную систему с тремя точками крепления *B*, *C*, *D* , как это показано на рис.1. Все точки крепления обладают возможностями упругих перемещений вдоль осей пространственной декартовой системы координат *x*, *y*, *z*. Точки *B* и *C* отражают динамическое взаимодействие рабочего органа с траверсой или рамой в виде балки, которая в общем случае, обладает поперечной, продольной и крутильной упругостями. Концы балки обозначены точками 0_1 и 0_2, а сама балка может иметь различные виды опирания и заделки. Каретка рабочего органа может перемещаться вдоль балки, что определяется координатами точек *B* и *C* (Y_{1Bi}, Y_{1Bi+1}, Y_{1Ci}, Y_{1Ci+1}). В точках *B* и *C* упругости представлены в виде компонент, отнесенных к осям координат: в точке *B* - $к_{1BX_1}$, $к_{1By_1}$, $к_{1Bz_1}$, в точке *C* -$к_{1CX_1}$, $к_{1Cy_1}$, $к_{1Cz_1}$. Учитывая конструктивно-технические особенности рабочего органа можно с достаточной уверенностью утверждать о наличии в точках крепления приведенных сил сопротивления, которые на предварительной стадии соответствуют вязкому трению, и принимаются малыми.

Точка опоры D, имеет в системе координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ координаты X_{1D}, Y_{1D}, Z_{1D}. Точка D одновременно является началом координат пространственной системы координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$, то есть точки D и O совпадают.

Характер взаимодействия точки D с обрабатываемой средой предполагает не только опирание (выполнение функции опоры), но и выполнение функций рабочего взаимодействия. В реальной конструкции точка D принадлежит заглаживающему диску, который совершает вращательные движения и магнитострикционные колебания с частотой порядка 20 КГц. Упругие свойства опоры в точке, также представляются в виде компонент по осям координат (K_{DX}, K_{DY}, K_{DZ}). Особенности упругого взаимодействия рабочего органа в точке D таковы, что они носят нелинейный характер. Последнее требует детализированных уточнений, которые связаны с учетом особенностей технологического процесса заглаживания.

Заглаживание может производиться с частичной или полной компенсацией веса рабочего органа, что достигается соответствующими механизмами вертикального подъема поперечной рамы или траверсы машины. Однако в процессе заглаживания диск рабочего органа неизбежно взаимодействует с бетонной смесью при перемещении каретки, и силы сопротивления, которые приходиться преодолевать, выступают внешними динамическими возмущениями. Они приложены в точке D, носят нестационарный характер и, в общем случае, описываются случайными функциями. Однако, учитывая фильтрующие свойства механической колебательной системы, можно для оценки динамического состояния ориентироваться в предварительных подходах на использование гармонических и полигармонических представлений.

Важным обстоятельством является нелинейный характер взаимодействия рабочего органа в точке D с бетонной смесью, нашедший отражение в том, что приведенная упругость в вертикальном направлении, и имеет вид

$$F = az + bz^3, \qquad (1)$$

где a и $в$ — коэффициенты, определяемые опытным путем.

Эксперименты показали, что на вид характеристики влияет состав бетонной смеси; при увеличении жесткости бетона нелинейные свойства проявляются более заметно. Для мягких бетонов график упругой зависимости на исследуемом участке контакта (1-1.5 мм) близок к линейному закону. Таким образом, рабочий орган, излучающий вибрации высокой частоты (до 20 Кгц) в технологическом процессе, связанном с необходимостью перемещения рабочего органа, вступает в динамическое взаимодействие с бетонной поверхностью, которое формирует спектр макровозмущений низкой частоты, воспринимаемых пространственной колебательной механической системой (рис.1) и могут, в связи с этим, оказать нежелательное воздействие на качество поверхности. Естественным развитием конструктивно-технического подхода является выбор параметров системы, обеспечивающий вывод из рабочих диапазонов технологического процесса, резонансов и неустойчивых режимов, что предполагает соответствующее использование математических моделей и изучения особенностей динамического состояния системы.

Отметим, что расчетная схема, приведенная на рис.1, отражает пространственные связи в системе. Поэтому заметное значение приобретают свойства симметричности системы. Если центр тяжести и центр упругости не лежат в одной плоскости или находятся в состоянии пространственного разобщения более сложной формы, то связность колебаний начинает сильно проявляться, то есть возмущения по любой из координат приводят к движениям по всем обобщенным координатам системы. Выходом из ситуации является обеспечение соответствующих форм симметрии рабочего органа.

Повышение степени защищенности рабочего органа от наведенных внешних вибраций связано также и с тем, что каретка с рабочим органом перемешается в процессе работы по траверсе, занимая различное положение относительно начала координат системы $O_1 X_1 Y_1 Z_1$. При этом балка в разных точках контакта имеет разные приведенные жесткости, массы и демпфирование. Снижение вибраций в местах крепления (точки B и C) может быть достигнуто установкой динамических гасителей колебаний, однако в этом случае необходимо обеспечить достаточно широкую зону их эффективной работы или делать их самонастраивающимися (управляемыми)[4].

Конструктивно-технические решения, например, могут быть связаны с установкой

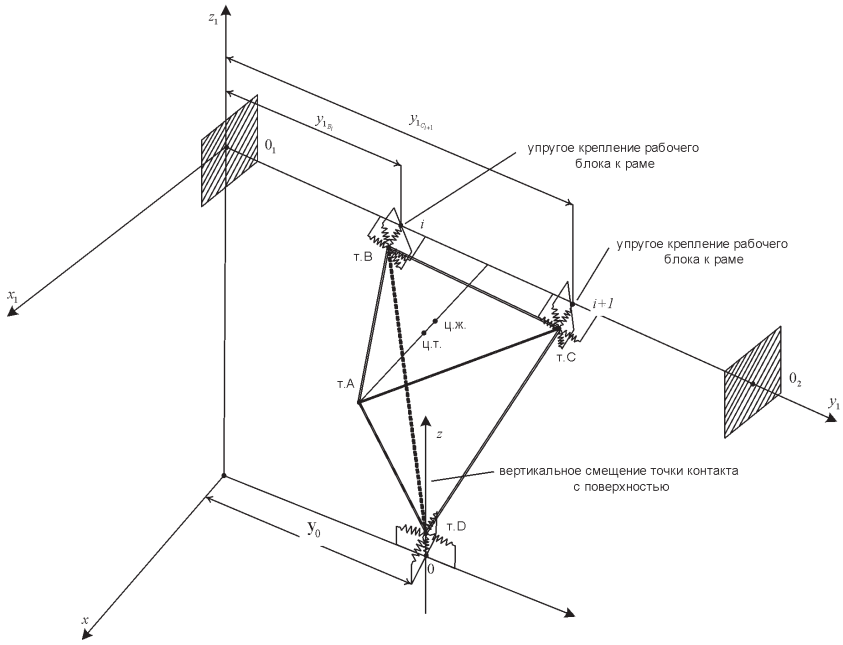


Рис.1. Пространственная расчетная схема рабочего органа, взаимодействующего с рамой машины (траверсой).

«противовеса», который разгружает рабочий орган от действия силы веса и, одновременно, выполняет роль динамического гасителя. В этом плане эффективной может оказаться конструкция каретки с двумя рабочими головкам, образующими тандем (или балансиры) в поперечном к траверсе направлениям. Наконец, во внимание должен быть принят такой источник внешних воздействий как электромеханический привод, с помощью которого обеспечивается вращательное движение заглаживающего диска. Спектр этих вибраций наиболее энергонасыщен на частотах в несколько десятков герц, что является достаточно близким к собственным частотам колебаний рабочего органа с кареткой [2,3].

Таким образом, при высокочастотном магнитострикционном возбуждении колебаний рабочего органа, передаче на него вращательного и поступательного движения из-за взаимодействия с обрабатываемой средой и динамических дефектов приводов возникают знакопеременные нагрузки, вызывающие вибрации конструкции в целом. Последнее оказывает влияние на качество заглаживания поверхности, уровень ее шероховатости, так как при малости вертикальных колебаний (сотые доли мм.), вызванных магнитострикционным вибровозбудителем, вклад колебаний от упругих смещений в системе может в несколько раз превосходить нормативные параметры.

Предложенная авторами расчетная схема отражает основные особенности и динамические свойства системы и позволяет оценить степень и уровень влияния конструктивно-технических факторов, сопровождающих технологический процесс заглаживания. Целесообразным, в этом плане, является представление поэтапного решение с выбором на начальный момент достаточно простой исходной модели в виде системы с одной степенью свободы, включающей нелинейные свойства упругого взаимодействия рабочего органа с обрабатываемой средой. На втором этапе рассмотрения могут быть использованы модели в виде упругих балок, взаимодействующих с точечным и сосредоточенными массоинерционными элементами.

2. Динамический расчет взаимодействия рабочего органа с траверсой заглаживающей машины.

Колебания рабочего органа заглаживающей машины возникают в результате реактивных усилий со стороны механизма вращения диска, приводимого в действие через редуктор электродвигателем. В свою очередь, перемещение рабочего органа вдоль траверсы сопровождается контактом с бетонной поверхностью. Взаимодействие с бетоном создает силы сопротивления, передающиеся в узлы крепления рабочего органа с траверсой, которые обладают упругостью. Сочетание упругих свойств в контакте с поверхностью и упругостей в местах крепления формирует нелинейную упругую восстанавливающую силу.

Таким образом, в первом приближении, расчетная схема рабочего органа может быть представлена в виде системы с одной степенью свободы, опирающейся на нелинейную пружину. Расчетная схема рабочего органа, взаимодействующего с траверсой, и представляет собой упругий стержень с сосредоточенной массой на конце, опирающейся другим концом на траверсу в виде упругой балки конечной длины. Учет нелинейных свойств и стохастической природы внешнего возмуще-

ния требует предварительной оценки возможностей в линейной постановке.

Рассмотрим приближенное решение задачи, заменив рабочую конструкцию системой с двумя степенями свободы. Распределенную массу балки (траверсы) можно привести к одной сосредоточенной массе μ_i, соответствующей массе рабочего блока (каретке) (рис.2).

Рассмотрим изгибные колебания невесомого участка балки с двумя сосредоточенными массами, одна из которых закреплена жестко, а вторая упруго (рис.2).

Обозначим амплитуды прогиба, угла поворота, изгибающего момента и поперечной силы соответственно через z_i, φ_i, M_i, Q_i. Введем матрицу - столбец параметров в i-м сечении:

$$Z_i = \begin{bmatrix} z_i \\ \varphi_i l \\ \dfrac{M_i l^2}{EJ} \\ \dfrac{Q_i l^3}{FJ} \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где l - пролет стержня; l_i - длина i-го участка стержня, заключенного между $(i-1)$-м и i-м сечениями; EJ - жесткость на изгиб некоторого участка стержня, принимаемого за основной.

Если рассматривать изгибные колебания невесомого участка стержня без сосредоточенных масс, зависимость между параметрами будет иметь вид

$$Z_i = G_i Z_{i-1}, \qquad (3)$$

где

$$G_i = \begin{bmatrix} 1 & \beta_i & \dfrac{\beta_i^2}{2\alpha_i} & \dfrac{\beta_i^2}{6\alpha_i} \\ 0 & 1 & \dfrac{\beta_i^2}{\alpha_i} & \dfrac{\beta_i^2}{2\alpha_i} \\ 0 & 0 & 1 & \beta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (4)$$

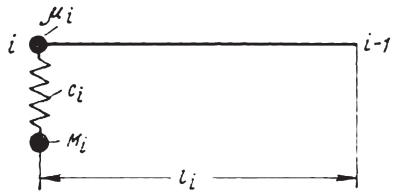


Рис.2. Схема невесомого участка стержня с двумя сосредоточенными массами, одна из которых закреплена жестко, а вторая - упруго.

В выражении (4) принято:

$\beta_i = \dfrac{l_i}{l}$; $\alpha_i = \dfrac{EJ_i}{EJ}$; l - пролет балок.

Если предположить, что в i-м сечении участка балки сосредоточена точечная масса μ_i, то при колебаниях стержня амплитудное значение перерезывающей силы в этом сечении претерпевает конечный разрыв на величину $\mu_i z_i \omega^2$. Введем матрицу M_i, осуществляющую точечное преобразование параметров при переходе через сечение i,

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ v_i & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (5)$$

здесь $v_i = \dfrac{\mu_i \omega^2 l^3}{EJ}$.

Для безмассового участка стержня длиной l_i с сосредоточенной массой μ_i переходной матрицей участка будет матрица

$$T_i = M_i G_i. \qquad (6)$$

Для решения поставленной задачи составим переходную матрицу участка стержня, показанного на рис. 2. Если обозначить амплитуду перемещения балки в i-м сечении через z_i, а амплитуду перемещения массы M_i через a_i, то можно получить

$$a_i = \frac{c_i z_i}{c_i - M_i \omega^2}. \qquad (7)$$

Прибавляя к выражению перерезывающей силы, подсчитанной в непосредственной близости к i-му сечению справа, величину

$$\frac{c_i z_i M_i \omega^2}{c_i - M_i \omega^2} + \mu_i \omega^2 z_i, \qquad (8)$$

получим выражение перерезывающей силы в непосредственной близости от i-го сечения слева. С учетом этого обстоятельства переходной матрицей участка (см. рис.2) будет

$$F_i = \begin{bmatrix} 1 & \beta_i & \dfrac{\beta_i^2}{2\alpha_i} & \dfrac{\beta_i^2}{6\alpha_i} \\ 0 & 1 & \dfrac{\beta_i^2}{\alpha_i} & \dfrac{\beta_i^2}{2\alpha_i} \\ 0 & 0 & 1 & \beta_i \\ \tau_i & \tau_i \beta_i & \dfrac{\tau_i \beta_i^2}{2\alpha_i} & 1 + \dfrac{\tau_i \beta_i^3}{6\alpha_i} \end{bmatrix}, \qquad (9)$$

где $\tau_i = \dfrac{\mu_i \omega^2 l^3}{EJ} + \dfrac{c_i M_i \omega^2 l^3 2\alpha_i}{EJ(c_i - M_i \omega^2)}$.

Матрицу F_i можно представить также в виде

$$F_i = \tau_i B_i + G_i, \qquad (10)$$

здесь

$$F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \beta_i & \dfrac{\beta_i^2}{2\alpha_i} & \dfrac{\beta_i^3}{6\alpha_i} \end{bmatrix}.$$

Для примера составим частотное уравнение собственных колебаний шарнирно опертой балки пролетом l с сосредоточенной массой, μ_i расположенной в середине пролета, к которой посредством пружины с жесткостью c_1 присоединена масса каретки M_1. Балку считаем невесомой, а поперечное сечение ее - постоянным вдоль пролета. Зависимость между параметрами можно представить равенством

$$Z_2 = G_2(\tau_1 B_1 + G_1)Z_0 = (\tau_1 G_2 B_1 + G)Z_0, \qquad (11)$$

где G - матрица, совпадающая с матрицей G_i при $\beta_1 = 1$.

Уравнение частот собственных колебаний в соответствии с условиями закрепления концов балки и отвечающими им матрицами

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_2 l \\ 0 \\ \dfrac{Q_2 l^3}{EJ} \end{bmatrix}, Z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_0 l \\ 0 \\ \dfrac{Q_0 l^3}{EJ} \end{bmatrix} \qquad (12)$$

принимает вид

$$\begin{vmatrix} a_{in} & a_{im} \\ a_{jn} & a_{jm} \end{vmatrix} = 0, \qquad (13)$$

где индексы i и j равны номерам нулевых строк матрицы Z_2, а индексы n и m совпадают с номерами не равных нулю строк матрицы Z_0. В нашем случае

$$\begin{bmatrix} 1 + \dfrac{\beta_1 \beta_2^3}{6}\tau_1 & \dfrac{1}{6} + \dfrac{\tau_1 \beta_1^3 \beta_2^3}{36} \\ \tau_1 \beta_1 \beta_2 & 1 + \dfrac{\tau_1 \beta_1^3 \beta_2}{6} \end{bmatrix} = 0. \qquad (14)$$

Обозначая жесткость балки в точке приведения массы через k_1, получим частотное уравнение

$$\omega^4 - \omega^2 \left(\frac{k_1 + c_1}{\mu_1} + \frac{c_1}{M_1} \right) + \frac{k_1 c_1}{\mu_1 M_1} = 0, \qquad (15)$$

где $k_1 = \dfrac{48EJ}{l^3}$.

Из уравнения (15) можно найти две частоты собственных колебаний, высшая из которых определится как:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_1}{2\mu_1}\left(1 + \frac{c_1}{k_1} + \frac{c_1 \mu_1}{k_1 M_1}\right) + \sqrt{\frac{k_1^2}{4\mu_1^2}\left(1 + \frac{c_1}{k_1} + \frac{c_1 \mu_1}{k_1 M_1}\right)^2 - \frac{k_1 c_1}{M_1 \mu_1}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{k_1}{2\mu_1}\left(1 + \frac{c_1}{k_1} + \frac{c_1 \mu_1}{k_1 M_1}\right) \times \sqrt{1 - \frac{4\mu_1 c_1}{k_1 M_1 \left(1 + \frac{c_1}{k_1} + \frac{c_1 \mu_1}{k_1 M_1}\right)^2}}}. \qquad (16)$$

Если выполняется неравенство

$$\frac{4\mu_1 c_1}{k_1 M_1 \left(1 + \frac{c_1}{k_1} + \frac{c_1 \mu_1}{k_1 M_1}\right)^2} << 1, \qquad (17)$$

то низшая частота может быть найдена из:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_1}{\mu_1}\left(1 + \frac{c_1}{k_1} + \frac{c_1 \mu_1}{k_1 M_1}\right)} = \sqrt{\frac{k_1}{\mu_1}\left(1 + \frac{c_1 (M_1 + \mu_1)}{k_1 M_1}\right)}, \qquad (18)$$

откуда получаем зависимость

$$\omega = \frac{\omega_\sigma^0}{\eta}, \qquad (19)$$

где $\omega_\sigma^0 = \sqrt{\dfrac{k_1}{\mu_1}}$; $\eta = \dfrac{1}{1 + \dfrac{\omega_B^2}{\omega_{\min\sigma}^2}}$; $\omega_B = \sqrt{\dfrac{c_1}{M_1}}$;

$\omega_{\min\sigma} = \sqrt{\dfrac{k_1}{M_1 + \mu_1}}$.

Найденные соотношения показывают, что для проведения динамического расчета разгрузочной балки можно сделать некоторые практические рекомендации.

1. Частоту собственных колебаний (а также амплитуду вынужденных колебаний) траверсы (как балки) можно определять без учета

массы и жесткости присоединения каретки, если

$$\frac{k_1}{c_1} > 10, \qquad (20)$$

где k_1 - коэффициент жесткости траверсы в той точке пролета, где его величина принимает минимальное значение; c_1 коэффициент суммарной жесткости упругих элементов, моделирующих соединение рабочего блока с балкой.

2. Если неравенство (20) не выполняется, то наименьшую частоту собственных колебаний траверсы можно находить по приближенной формуле (19), где ω и ω_σ^0 - наименьшие круговые частоты собственных колебаний конструктивного соединения, соответственно с учетом влияния упруго закрепленного рабочего блока (каретки) и без учета этого влияния; η - коэффициент, характеризующий влияние упруго присоединяемой массы рабочего блока на частоту собственных колебаний траверсы; ω_B - круговая частота собственных колебаний рабочего блока на упругих опорах; $\omega_{\min\sigma}$ - круговая частота собственных колебаний траверсы в предположении, что масса рабочего блока жестко присоединена к траверсе.

После жесткого присоединения масс каретки к траверсе определение частот собственных колебаний можно выполнять с помощью переходных матриц (2) и (5).

В случае действия гармонической силы $P_i \sin\Omega t$ в i-м сечении балки зависимость между параметрами в сечениях i-1 и i будут выражаться равенством

$$Z_i = A_i Z_{i-1} + \Psi_i, \qquad (21)$$

где

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dfrac{P_i l^3}{EJ} \end{bmatrix}.$$

Величина амплитуды силы P_i действующей на поддерживающую конструкцию, может быть найдена из рассмотрения виброизолированной системы, закрепленной на неподвижном основании.

Величину приведенной массы μ_i можно найти из условия, что кинетическая энергия системы с распределенной массой равна кинетической энергии системы с сосредоточенной (приведенной) массой. Примем за линию прогиба системы, отвечающую колебаниям какой-либо частоте, выражение

$$z^{\cdot}(x,t) = z(x)T(t), \qquad (22)$$

где $z(x)$ зависит только от x, а $T(t)$ - только от t.

Кинетическую энергию системы с распределенной массой $m(x)$ можно представить в виде

$$E = \frac{1}{2}\int_0^l m(x)\left(\frac{\partial z^{\cdot}}{\partial t}\right)dx = \frac{1}{2}(T)^2\int_0^l m(x)[z(x)]^2\,dx, \qquad (23)$$

где интегрирование распространяется на всю длину балки.

Кинетическая энергия невесомой балки с сосредоточенной массой в точке $x = x_i$ будет равна

$$\frac{1}{2}\mu_i\left(\frac{\partial z^{\cdot}}{\partial t}\right)^2_{x=x_i} = \frac{1}{2}(T)^2\mu_i\left[z(x)\right]^2. \qquad (24)$$

Приравнивая выражения (23) и (24), находим

$$\mu_i = \frac{\int_0^l m(x)\left[z(x)\right]^2 dx}{\left[z(x)\right]^2}. \qquad (25)$$

Задаваясь формой колебаний $z(x)$, можно определить величину приведенной массы. В частности, для траверсы с равномерно распределенной массой $(m = const)$, шарнирным закреплением концов и пролетом l, приведенная в середине пролета масса $\mu_1 = 17ml/35$.

Величину приведенной массы можно также определить по известному значению коэффициента жесткости балки K_i, если приравнять значение низшей круговой частоты собственных колебаний балки, найденной с учетом распределенной массы, частоте собственных колебаний невесомой балки с сосредоточенной массой $\omega_\sigma^0 = \sqrt{K_i/\mu_i}$. Заметим также, что, приравнивая частоту Ω нулю в приведенных выше переходных матрицах, можно определить прогиб балки в любой точке пролета. Относя величину силы, действующей в этом сечении, к прогибу, легко найти значение коэффициента жесткости K_1.

Остановимся на более точном решении задачи о расчете балки, поддерживающей упруго закрепленную сосредоточенную массу, подверженную гармоническому возмущению. Предположим, что на упруго закреплен-

ную массу M_i (рис.2) действует гармоническая сила $P_i \sin\Omega t$. Учитывая, что при вынужденных установившихся колебаниях массы M_i и балки амплитуда колебаний массы M_i определяется выражением

$$a_i = \frac{P_i + c_i z_i}{c_i - M_i \Omega^2}, \qquad (26)$$

находим величину амплитуды перерезывающей силы в i-м сечении

$$\frac{c_i\left(P_i + M_i \Omega^2 z_1\right)}{c_i - M_i \Omega^2} + \mu_i \Omega^2 z_i . \qquad (27)$$

С учетом (26) и (27) зависимость между параметрами на границах рассматриваемого участка принимает вид

$$Z_i = F_i Z_{i-1} + \Lambda_i . \qquad (28)$$

Здесь матрица F_i определяется выражением (9). Матрица Λ_i имеет следующую структуру:

$$\Lambda_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ d_i \end{bmatrix}, \qquad (29)$$

где

$$d_i = \frac{c_i P_i l^3}{EJ(-M_i \Omega^2 + c_i)},$$

c_i - коэффициент жесткости упругого закрепления; l - длина пролета, EJ - изгибная жесткость некоторого участка, принятого за основной.

В качестве примера рассмотрим вынужденные колебания шарнирно опертой однопролетной балки постоянного сечения, распределенная масса которой заменена одной сосредоточенной в середине пролета массой $\mu_1 \approx ml/2$. К массе μ_1 упруго прикреплена масса M_1, подверженная действию возмущающей силы $P_i \sin\Omega t$. Требуется найти амплитуду перемещения в середине пролета.

Разбивая балку на два участка, выразим параметры напряженного и деформированного состояния во втором сечении (на левой опоре) через параметры в первом сечении (на правой опоре) в виде

$$Z_2 = G_2(F_1 Z_0 + \Lambda_1), \qquad (30)$$

где матрицы G_2, F_1, Λ_1 определяются выражениями (4), (9), (29).

Производя перемножения матриц в уравнении (5.29) и учитывая условия на концах балки, находим:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_2 l \\ 0 \\ \dfrac{Q_2 l^3}{EJ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\tau_1\beta_2^3}{6}+1 & \dfrac{\tau_1\beta_1\beta_2^3}{6}+1 & \dfrac{\tau_1\beta_1^2\beta_2^3}{12}+\dfrac{1}{2} & \dfrac{\tau_1\beta_1^3\beta_2^3}{12}+\dfrac{1}{6} \\ \dfrac{\tau_1\beta_2^2}{2} & \dfrac{\tau_1\beta_1\beta_2^3}{2}+1 & \dfrac{\tau_1\beta_1^2\beta_2^2}{4}+1 & \dfrac{\tau_1\beta_1^3\beta_2^2}{12}+\dfrac{1}{2} \\ \tau_1\beta_2 & \dfrac{\tau_1\beta_1\beta_2^3}{2}+1 & \dfrac{\tau_1\beta_1^2\beta_2^3}{2}+1 & \dfrac{\tau_1\beta_1^2\beta_2^3}{12}+\dfrac{1}{2} \\ \tau_1 & \tau_1\beta_1 & \dfrac{\tau_1\beta_1^2}{2} & \dfrac{\tau_1\beta_1^3}{6} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_2 l \\ 0 \\ \dfrac{Q_2 l^3}{EJ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{d_1\beta_2^3}{6} \\ \dfrac{d_1\beta_2^2}{2} \\ d_1\beta_2 \\ d_1 \end{bmatrix}, \qquad (31)$$

где

$$\tau_1 = \frac{\mu_1 \Omega^2 l^3}{EJ} + \frac{c_1 M_1 \Omega^2 l^3 2}{EJ(c_1 - M_1 \Omega^2)};$$

$$d_1 = \frac{c_1 P_1 l^3}{EJ(-M_1 \Omega^2 + c_1)}.$$

а из уравнения (31) соответственно -

$$\varphi_0 l = \frac{d_1(\beta_2 - \beta_2^3)}{6\left[1 + \dfrac{\tau_1}{6}\left(\beta_1\beta_2^3 + \beta_1^3\beta_2 - \beta_1\beta_2\right)\right]};$$

$$Q_0 l = \frac{d_1 \beta_2}{\left[1 + \dfrac{\tau_1}{6}\left(\beta_1\beta_2^3 + \beta_1^3\beta_2 - \beta_1\beta_2\right)\right]}. \qquad (32)$$

Параметры балки в сечении будут определяться уравнением

$$Z_1 = G_1 Z_0, \qquad (33)$$

откуда при $\beta_1 = \beta_2 = \dfrac{1}{2}$, получим

$$Z_1 = \frac{c_1 P_1}{\mu_1 M_1 \Omega^4 - \Omega^2(k_1 M_1 + c_1 M_1 + c_1 \mu_1) + k_1 c_1}, \qquad (34)$$

где k_1 - коэффициент жесткости балки в точке расположения приведенной массы μ_1

$$k_1 = \frac{6EJ}{l^3\left(\beta_1\beta_2^3 + \beta_1^3\beta_2 - \beta_1\beta_2\right)}. \qquad (35)$$

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Белокобыльский С.В., Кашуба В.Б. Моделирование режимов работы машины для заглаживания бетонных поверхностей // Труды 45-ой Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии транспорту и промышленности», ДВГУПС. Владивосток. 2007. С.144-149.
2. Белокобыльский С.В., Кашуба В.Б. Особенности контактного взаимодействия вибрирующих рабочих органов с бетонной поверхностью в технологиях заглаживания // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. Вып. №2 (14). Иркутск. 2007. С. 31-38.
3. Мамаев Л.А., Кононов А.А., Герасимов С.Н., Кашуба В.Б. Экспериментальные исследования в области обработки бетонных поверхностей. БрГУ, Братск. 2006. 146 с.
4. Елисеев С.В., Нерубенко Г.П. Динамические гасители колебаний. Наука. Новосибирск. 1990. 232 с.

Сигачев Н.П., Тюпин В.Н.

УДК 625.143+629.024

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ВЫБРОСЕ БЕССТЫКОВОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ВИБРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Искусственное или естественное создание в рельсовых плетях бесстыкового железнодорожного пути дополнительных напряжений приводит к горизонтальному или вертикальному выбросу пути и подчас к сходу подвижного состава с рельс. Это существенно снижает уровень безопасности при движении поездов.

К естественным физическим полям, создаваемым в рельсах, относится температурное воздействие от солнечного излучения или изменения температуры воздуха. Это приводит к формированию температурных сжимающих напряжений в рельсах, которые достигают 10^7 -10^8Па при нагревании рельса на 10-50°С. При этом допустимое значение контактного давления на рельс составляет $8 \cdot 10^7$ -$1{,}2 \cdot 10^8$ *Па.*

К искусственному физическому полю относится вибродинамическое воздействие движущегося поезда на рельсы. Причем, согласно экспериментальных данных ВНИИЖТ и теоретических исследований [1] величина сжимающих напряжений в рельсах непосредственно под колесом составляет $8 \cdot 10^7$ - $2{,}5 \cdot 10^8$ *Па .*

Многочисленными натурными наблюдениями [2] установлено, что выбросы бесстыкового рельсового пути происходят при температурном воздействии, но наиболее часто при комплексном температурном и вибродинамическом воздействии движущегося поезда. Причем при комплексном воздействии выбросы наблюдаются на расстоянии до 50 м [2] от локомотива подвижного состава, наиболее часто на расстоянии до 3 м. Этими же исследованиями установлено, что температура рельс при выбросе в 1,8-2 раза превышает температуру их закрепления. При выбросе в вертикальной плоскости длина волны выброса составляет 8-12 м со стрелой изгиба (величиной подъема пути вверх) равной 0,2-0,3 м. При выбросе в горизонтальной плоскости длина вол-

ны составляет 20-40 м, стрела изгиба - 0,2-0,4 м. Процесс температурного выброса колеи длится всего 0,2 с, причем происходит, как правило, в горизонтальной плоскости [2].

В работе [2] дается механизм выброса рельсовой колеи и приводится большой экспериментальный материал по параметрам выброса. В работе [3] приводится подробный математический вывод параметров при температурном выбросе колеи с определением критической силы, предельной длины и критериев устойчивости бесстыкового пути. Математические расчеты основаны на силовом подходе, поэтому не учитывают многих геометрических и физико-технических свойств рельсового пути, шпал и балласта. Кроме того, в них не определена стрела изгиба (величина сдвига) пути.

В настоящей работе на основе закона сохранения энергии определяется стрела изгиба, то есть горизонтальное смещение рельсовой плети и приведены критерии устойчивости пути. Задача решается при условии движения колеса по рельсовой плети, находящейся в температурном поле, превышающем температуру закрепления. Концы рельсовой плети жестко закреплены.

Энергия упругих деформаций W_T, созданных температурными напряжениями в рельсе и вибродинамическим воздействием поезда $W_{еиб}$, расходуется на изгиб рельсовых плетей в месте выброса $W_{изг}$ и преодоление сил трения шпал о балласт $W_{тр}$, то есть

$$W_T + W_{виб} = W_{изг} + W_{Тр}. \qquad (1)$$

Входящие в (1) величины определяются по формулам на основе работ [1,4,5]

$$W_T = \frac{\sigma_m^2}{2E_p} V_n; W_{виб} = \frac{\sigma^2(r)}{2E_p} V_{виб}; \qquad (2)$$

$$W_{изг} = \frac{\sigma_T^2}{2G}\left(\frac{v}{1-v}\right)^2 V_B;$$
$$W_{Тр} = \mu\left[\sigma_T\left(\frac{v}{1-v}\right) + \sigma_{Гр}\right] S_{шп}\ell_B, \qquad (3)$$

где σ_T - термические напряжения, возникающие в закрепленном рельсе при увеличении температуры, Па;

E_p - модуль упругости рельсовой стали, Па;

V_n - объем одной рельсовой плети между двумя точками закрепления, подверженный температурному воздействию, м^3;

$\sigma(r)$ - величина сжимающего напряжения, создаваемого в рельсовой плети при движении по ней одного колеса, Па;

v - коэффициент Пуассона рельсовой стали;

$V_{виб}$ - объем рельса перед движущимся поездом, подверженный наибольшим вибрациям, м^3;

G - модуль сдвига рельсовой стали, Па;

$V_в$ - объем выброса рельсовой плети, м^3;

$\sigma_{Гр}$ - напряжение в балласте, создаваемое весом элемента рельсовой плети (вес рельса на 1 шпалу, вес половины шпалы), Па;

μ - коэффициент трения между шпалой и балластом;

$S_{шп}$ - площадь контакта нижней поверхности половины шпалы с щебенкой, м^2;

ℓ_B - величина подвижки рельсовой плети (стрела изгиба) в зоне выброса, м. Распределение напряжений перед выбросом представлено на рис. 1.

Подставляя (2) и (3) в (1), получим

$$\ell_B = \frac{\sigma_T^2\left[\frac{V_П}{E_p} - \frac{V_B}{G}\left(\frac{v}{1-v}\right)^2\right] + \frac{\sigma^2(r)}{E_p} V_{виб}}{2\mu\left[\sigma_T\left(\frac{v}{1-v}\right) + \sigma_{Гр}\right] S_{шп}}. \qquad (4)$$

Математические формулы величин, входящих в (4), определяются по следующим формулам. Величина температурных напряжений, возникающих в материале согласно известным законам физики, равна

$$\sigma_T = \Delta T \beta E_p, \qquad (5)$$

где ΔT - величина превышения температуры материала, °С ;

β - коэффициент линейного теплового расширения, 1/°С .

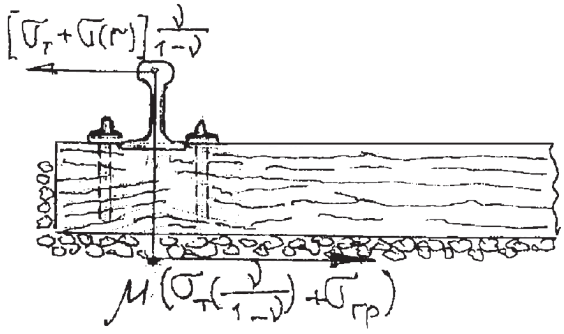


Рис.1. Схема распределения напряжений при температурно-вибродинамическом выбросе рельсовой плети.

Объем деформирования рельсовой плети $V_П$ и величины $V_{виб}$, $V_В$ определяют по формулам:

$$V_i = m_1 L_i \cdot \rho^{-1} = S_p L_i, \qquad (6)$$

где V_i - соответствующие объемы деформирования рельсовой плети, м^3;

m_1 - масса 1 метра рельса, кг/м;

ρ - объемная масса рельса, кг/м^3;

L_i - длина рельса, $L_П$ - длина укладываемой плети, $L_{виб}$ - длина рельса от переднего колеса локомотива, подверженная наибольшим вибрациям, $L_В$ - длина рельса в зоне выброса, м;

S_p - площадь поперечного сечения рельса, м^2.

Величина сжимающих напряжений, создаваемых подвижным составом в рельсовой плети впереди состава определена по упрощенной формуле из [5]

$$\sigma(r) = \left(\frac{m\upsilon^2 E_ш}{\pi R в_П r} \right)^{0,5}, \qquad (7)$$

где m - масса части локомотива, действующего на элемент рельсовой плети, кг;

υ - скорость движения поезда, м/с;

$E_ш$ - модуль упругости шпалы, Па;

R - радиус колеса, м;

$в_П$ - ширина подкладки, м;

r - расстояние от переднего колеса локомотива до предполагаемого места выброса, м.

Напряжение в балласте, создаваемое весом элемента рельсового пути определено по формуле:

$$\sigma_{Гр} = m_э g S_{шп}^{-1}, \qquad (8)$$

где $m_э$ - масса элемента железнодорожного пути, $m_э \approx$140-150 кг (при железобетонных шпалах);

g - ускорение свободного падения, м/с^2.

Модуль сдвига рельса определяется через модуль упругости по известной формуле:

$$G = \frac{E_p}{2(1+\upsilon)}. \qquad (9)$$

Формула (4) для определения величины подвижки рельсовой плети весьма сложна для расчетов и анализа влияния факторов на выброс плети. Проведем численный анализ параметров, входящих в формулу (4).

В начале рассмотрим случай выброса только при температурном воздействии.

При этом численный анализ показал, что величина $\sigma_{гр} << \sigma_T \nu (1-\nu)^{-1}$. Тогда (4) с учетом (5), (6) и (9) имеет вид

$$\ell_в = \frac{\Delta T \beta S_p \left[L_П - 2L\beta(1+\nu)\left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)^2 \right](1-\nu)}{2\mu\nu S_{шП}}. \qquad (10)$$

При комплексном температурном и вибродинамическом воздействии величина подвижки рельсовой плети с учетом (5), (6), (7), (9) и учете того, что $V_П >> V_В$ определится:

$$\ell_В = \frac{(\Delta T\beta)^2 S_p L_П + \frac{m\upsilon^2 E_ш}{\pi R в_П r E_р^2} S_р L_{виб}}{2\mu\Delta T\beta\left(\frac{\nu}{1-\nu}\right) S_{шП}}. \qquad (11)$$

Для доказательства достоверности полученных формул проведем их численный анализ по определению величины горизонтальной подвижки рельсового пути и сравним с имеющимися экспериментальными данными [2]. Примем исходные данные для расчетов:

$\Delta T = 50°$, $\beta = 11{,}8\text{-}10^{-6}$ 1/°С, $S_p = 8{,}2\text{-}10^{-3}$ м^2, $L_П = 800$ м, $L_В = 10$ м, $\nu = 0{,}27$, $\mu = 0{,}3$, $S_{шП} = 2{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}25 = 0{,}084$ (0,25 - доля поверхности контакта щебенки с нижней плоскостью шпалы), $m = 1{,}2 \cdot 10^4$ *кг* (электровоз ВЛ-80), $\upsilon = 10$ *м/с*, $E_ш = 3 \cdot 10^{10}$Па (шпала железобетонная), $R = 0{,}5$м, $в_П = 0{,}36$м, $r = L_{виб} = 3$м, $E_p = 2{,}1$ -10" *Па*. Расчет по формуле (10) дает $\ell_в = 0{,}32$м, а по формуле (11) - $\ell_в = 0{,}49$м .

В работе [2] приводятся многолетние производственные данные по выбросу путей как просто при температурном воздействии, так и при комплексном температурно-вибродинамическом воздействии. Величина подвижки рельсовых плетей (стрела выброса) в [2] составляет от 0,2 до 0,4-0,5м, что указывает на достоверность полученных формул. Результаты расчета по (10) приведены на рис.2.

Анализ формул (10) и (11) показывает, что наиболее существенно на величину подвижки влияют регулируемые параметры: величина превышения температуры ΔT, длина бесстыковой плети $L_П$, коэффициент трения между балластом и шпалой μ, площадь контакта шпалы с балластом S_{wn}. Отметим также, что весьма существенно на$1_В$ влияет скорость

движения поезда u. Малорегулируемым параметром является коэффициент Пуассона рельсовой стали v, хотя увеличение v с 0,25 до 0,35 приводит к уменьшению ℓ_B в 1,6 раза.

В технической литературе при рассмотрении вопросов устойчивости бесстыковых рельсовых плетей от горизонтального выброса используют критерии, которые основаны на определении критических напряжений и предельной величины изменения температуры в рельсовых плетях.

Согласно [6] условие прочности бесстыкового пути определяется выражением

$$k_n\sigma_к + \sigma_T \le [\sigma], \qquad (12)$$

где k_n - коэффициент запаса прочности, равный 1,3;

σ_k - напряжение в рельсах, вызванное движением подвижного состава, Па;

$[\sigma]$ - допустимое напряжение в рельсах, принимаемое равным пределу текучести рельсовой стали, Па;

Согласно вышеизложенному (12) можно переписать в виде

$$\left(\frac{m\upsilon^2 E_ш}{\pi R в_П r}\right)^{0,5}\left(\frac{v}{1-v}\right)k_n + \Delta T\beta E_р \le [\sigma] \qquad (13)$$

Численные расчеты по формуле (13) с учетом вышеприведенных численных значений параметров и $[\sigma] = 3,5\cdot 10^8$ *Па* дают результат: в левой части суммарная величина равна 1,94 10^8 *Па*, что меньше 3,5 10^8 *Па*, то есть выброса рельсового пути не произойдет.

Предельную величину изменения температуры в рельсовых плетях можно определить из (10), пренебрегая весьма малой величиной в квадратных скобках, тогда

$$\Delta T > \frac{2\mu v S_{шп} l_в}{\beta S_р L_П (1-v)}. \qquad (14)$$

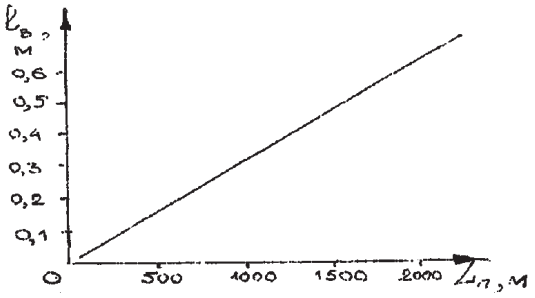


Рис.2. Зависимость величины сдвига рельсовой плети в $\ell_В$ от длины бесстыковой части плети ($L_П$), при превышении температуры скрепления плети $\Delta T = 50^\circ C$.

То есть, выброс пути произойдет в том случае, если фактическая температура ΔT превысит величину в правой части (14). Численные расчеты по формуле (14) при условии, что безопасной величиной подвижки пути является $\ell_B = 0{,}15$ *м* и численных значениях параметров приведенных ранее дают $\Delta T = 36{,}2^\circ C$, что при сопоставлении с данными [6] говорит о достоверности зависимости (14).

На основании проведенных теоретических исследований можно разработать ряд технических мероприятий по предотвращению выброса пути. Это увеличение коэффициента трения и площади контакта между шпалой и балластом, а также увеличение коэффициента Пуассона рельсовой стали. Сюда можно отнести также уменьшение скорости движения подвижного состава. В качестве балласта не рекомендуется применять песчаный, гравийный, шлаковый, асбестовый как имеющие наименьший коэффициент трения.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Тюпин В.Н. Определение напряженно - деформированного состояния железнодорожного пути при движении нагруженного колеса с использованием закона сохранения энергии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование./ ИрГУПС.-2005.- №4.-С.57-64.
2. Лысюк В.С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов. -М.: Транспорт, 1997.-188 с.
3. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь: Учебник для вузов ж.-д. трансп.-3-е издание, перераб. и доп.-М.: Транспорт, 1987.-479 с.
4. Тюпин В.Н. Повышение эффективности геотехнологии с использованием энергии взрыва при деформировании трещиноватых напряженных массивов горных пород. // Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. - М.: ВНИПИ промтехнологии, -2002. — 267 с.
5. Тюпин В.Н. Оценка вибродинамического воздействия движущегося поезда на физико-технические свойства многолетней мерзлоты. -В сб. трудов «Перспективы технического развития путевого комплекса ОАО «РЖД».-Москва: изд. журнала «Путь и путевое хозяйство».-2000.-С. 65-69.
6. Справочник инженера - путейца./Под ред. В.В. Басилова и М.А. Чернышева.-Т.1 Транспорт.-1972.-768 с.

Соболев В.И., Готовский Д.С.

УДК 621.09.014

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЯХ С УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИМИ И КИНЕМАТИЧЕСКИМИ СЕЙСМОИЗОЛЯТОРАМИ

Землетрясения могут быть страшными природными катастрофами, способными унести десятки и сотни тысяч человеческих жизней и вызывать опустошительные разрушения на огромных пространствах.

Седьмого декабря 1988 года в Армении произошло мощное землетрясение, названное Спитакским по наименованию города, полностью стертого с лица Земли. Тогда за несколько секунд погибло более 25 тыс. человек, а несколько сот тысяч получили ранения. Трагедией обернулось землетрясение на севере Сахалина в 1995 году в Нефтегорске, когда рухнули несколько зданий, под обломками которых погибли 2 тыс. человек.

Этот список можно продолжать бесконечно, так как землетрясения разной силы и в разных районах земного шара происходят периодически, нанося огромный материальный ущерб и приводя к многочисленным жертвам.

По результатам анализа последствий интенсивных землетрясений известно, что далеко не все здания, подверженные сейсмическим воздействиям, бывают разрушенными. Сохранившиеся здания и сооружения также имеют разнородные повреждения, существенно отличающиеся друг от друга по своему уровню и характеру, - при одном и том же сейсмическом воздействии здания могут иметь повреждения от поверхностных трещин до полной потери функциональности несущих конструкций [1]. **Это обстоятельство позволяет утверждать о том, что конструктивные решения и специфические свойства здания могут играть значительную роль в обеспечении его целостности при сейсмическом воздействии.**

Решение задач обеспечения целостности конструкции или минимизации повреждений на основе выявления этих свойств является насущно необходимым в условиях регионов активных сейсмических проявлений. **Актуальность решения этих задач отражена в постановлении правительства России «О федеральной целевой программе "СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ"» от 25 сентября 2001 г. N 690, в которой обозначены проблемы сейсмостойкости как существующих, так и вновь возводимых зданий.**

Сейсмическая безопасность зданий и промышленных сооружений закладывается на этапе проектирования или реконструкции на основе современных достижений теории сейсмостойкости. В соответствии с существующими представлениями сейсмобезопасность можно обеспечить:

·путем формирования прочностных свойств несущих конструкций сооружения, способных сохранить несущую способность при высоких уровнях нагрузки, сопровождающих сейсмические воздействия;

·путем конструктивного формирования динамических свойств сооружения, обеспечивающих достаточно малый уровень сейсмического воздействия;

·путем введения специальных дополнительных устройств — сейсмоизоляторов, понижающих уровень сейсмического воздействия.

Способ использования сейсмоизоляторов является наиболее эффективным.

Наиболее распространенным видом устройств сейсмоизоляции в отечественной практике являются специальные кинематические фундаменты, представляющие собой механические устройства, использующие эффекты качения, скольжения, трения, и т.д. в различных сочетаниях. Наиболее известными примерами в этой области являются кинематические опоры В.В.Назина [5,6], А.М.Курзанова [7], Ю.Д.Черепинского [8,9]. Здания на таких опорах построены в Петропавловске-Камчатском, Навои, Южно-Сахалинске, Сочи и других сейсмически опасных регионах стран СНГ. Ниже приведена детальная классификация сейсмоизолирующих фундаментов гравитационного типа (таблица 1) и их общие характеристики.

Наиболее существенным недостатком работы таких фундаментов, является неравномерная загрузка опор. В патентной литературе имеется более сотни предложений по устройству гравитационных кинематических фундаментов. Такое обилие предложений объясняется тем, что изменение поверхности катания опор такого фундамента может привести к изменению характеристик системы в целом, и, соответственно, к вырождению технического эффекта. Существенным фактором является то обстоятельство, что при статических нагрузках от веса многоэтажного сооружения обеспечить «чистый» эффект качения практически невозможно; пятно контакта поверхностей качения является достаточно большим даже при использовании очень жестких и твердых материалов.

Ещё одним типом сейсмоизоляции являются фундаменты на упруго-пластических элементах и их основной вид — резинометаллические опоры. В настоящее время такие сейсмоизолирующие элементы, являются наиболее применяемыми за рубежом [2,3,4]. Упругопластические опоры лишены недостатков, свойственных конематическим фундаментам и применение их при корректном подборе параметров системы сейсмоизоляции достаточно эффективно.

При проектировании зданий расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций при различных сочетаниях нагрузок (в том числе и сейсмической) выполняются при помощи компьютера с использованием специализированных программных средств, реализующих численные методы, основанные на дискретизации конструкций.

Современная практика расчетов зданий и сооружений на сейсмические воздействия, основанная на действующих нормах СНиП, использует преимущественно спектральную методику, предполагающую наличие в рассчитываемых конструкциях линейных упруго-диссипативных элементов ненулевой жесткости. Это условие является необходимым для обеспечения статической устойчивости рассчитываемой системы, а введение в расчетную схему механических — геометрически изменяемых систем приводит к вырожденности матриц жесткости в результате чего расчет по данной методике становится невозможным.

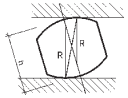
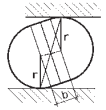
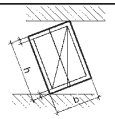
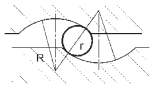
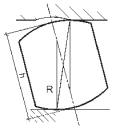
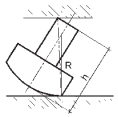
Использование упругопластических элементов — сейсмоизоляторов также делает невозможным непосредственное использование спектральной методики расчета, основанной на представлении динамической системы в пространстве ортогональных собственных векторов, являющихся свойствами только линейных динамических систем. **Введение нелинейных кинематических или упругопластических элементов приводит к неизбежной связанности колебательных мод, способных осуществлять энергетический обмен; этот факт хорошо известен в теории нелинейных колебаний** [10,11]. **В этом случае приведение исходной многосвязной системы уравнений к раздельным дифференциальным уравнениям (дающим решение спектральным методом) – невозможно.** Интересно заметить, что крайне актуальный в задачах сейсмостойкости вопрос о допустимости и границах допустимости линейной аппроксимации нелинейной системы с целью использования преобразования по собственным векторам в публикациях отсутствует.

Предложенная авторами статьи методика расчета зданий, снабженных упругопластическими элементами, основана на численном моделировании нестационарных процессов динамического взаимодействия нелинейно-связанных подсистем. Формализованное изложение методики моделирования выходит за рамки этой статьи.

В словесном описании методика состоит в следующем:

Табл. 1.

Параметры состояния кинематических элементов.

№		Тип и схема опоры	Уравнения движения опор	Упрощенный вид однородных уравнений
1	Опора Назина В.В.		$\ddot{\alpha}\left(4-4\chi\cos\alpha+\chi^2\right)+2\chi\dot{\alpha}^2\sin\alpha+\frac{g}{R}\chi\sin\alpha=0$ $\chi=2-h/R$	$\ddot{\alpha}+k_1^2\alpha=0;\quad k_1^2=k^2t_0^2;\quad \tau=t/t_0$
2	Опора Найбурга Э.В.		$\ddot{\alpha}\left(4+4\chi\cos\alpha+\chi^2\right)+2\chi\dot{\alpha}^2\sin\alpha+\frac{g}{r}\chi\cos\alpha\sin\alpha=0$ $\chi=b/r$	$\ddot{\alpha}+k_2^2 1.3\left(\mu^{3/2}\alpha\right)^{1/21}=0$
3	Опора Курзанова А.М.		$\ddot{\alpha}\left[1+\beta^2+4\nu\left(\nu+\cos\alpha+\beta\sin\alpha\right)\right]+2\nu\dot{\alpha}^2\left(\beta\cos\alpha-\sin\alpha\right)+$ $+\frac{g}{R}\left(\beta\cos\alpha-\sin\alpha\right)sign\alpha=0;\quad \beta=b-\frac{2r}{h};\quad \nu=\frac{r}{h}.$	$\ddot{\alpha}+k_3^2 1.3\left(\mu^{3/2}\alpha\right)^{1/21}=0$
4	Опора "шар в лунке"		$\ddot{\alpha}\left(2+2\cos\alpha\right)-\dot{\alpha}^2\sin\alpha+\frac{g}{r}\left(\chi-1\right)\sin\alpha=0$ $\chi=R/r$	$\ddot{\alpha}+k_4^2\alpha=0$
5	Опора "шар в лунках"		$\ddot{\alpha}+\frac{g}{2R}\left(1-\frac{r}{R}\right)\sin\alpha=0$	$\ddot{\alpha}+k_5^2\alpha=0$
6	Опора Безрукова Ю.И.		$\ddot{\alpha}\left[2+\chi^2-2\chi\left(\cos\varphi-\cos\alpha\right)+2\cos\left(\varphi-\alpha\right)\right]+$ $+\dot{\alpha}^2\left[\chi\sin\alpha-\sin\left(\varphi-\alpha\right)\right]+\frac{g}{R}\left[\sin\alpha-\sin\left(\varphi-\alpha\right)\right]=0;$ $\chi=\left(2R-h\right)/R$	при больших колебаниях: $0.1\le\chi\le0.7$, $\alpha=0.1$ $4\ddot{\alpha}-k_6^2 1.3/\pi\left(\varphi-\alpha\right)\mu^{3/42}\left(\varphi-\alpha\right)^{1/21}=0$ при малых колебаниях: $0.1\le\chi\le0.7$, $\alpha=0.1$, $4\ddot{\alpha}-1/2\,k_6^2\left(\varphi-\alpha\right)=0$ при больших колебаниях: $\chi=2$, $-4\chi\ddot{\alpha}+k_6^2\chi\alpha=0$ при малых колебаниях: $\chi=2$, $-4\chi\ddot{\alpha}-1/2\,k_6^2\left(\varphi-\alpha\right)=0$
7	Опора Черепинского Ю.Д.		$\ddot{\alpha}\left(1+\mu_1^2+\chi^2+2\chi\cos\alpha+2\mu_1\sin\alpha\right)+\frac{\dot{\alpha}^2}{2}\left(-2\chi\sin\alpha+2\mu_1\cos\alpha\right)+$ $+\frac{g}{R}\left(-\chi\sin\alpha+\mu_1\cos\alpha sign\alpha\right)=0;\quad \mu_1=\frac{b}{2R};\quad \chi=\frac{h-R}{R}$	$\ddot{\alpha}+k_7^2\frac{2}{\pi}\mu_1 1.3\left(\mu^{3/2}\alpha\right)^{1/21}=0$ Примечание: $sign\alpha=\frac{2}{\pi}1.3\mu^{3/42}\alpha^{1/21}$, $\mu=100$ $k_1,k_2,\ldots,k_7$ - частоты колебаний (безразмерные)

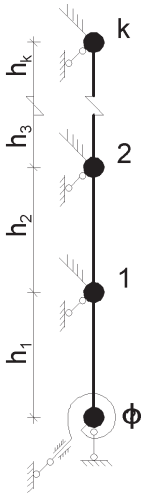


Рис.1. Вариант консольной модели *k*- этажного здания.

·с использованием известных методов [12] осуществляется конечноэлементная дискретизация расчетной области;

·дискретная динамическая система разбивается на две линейных части, нижнюю **(НЛС)** — расположенную ниже сейсмоизоляторов и верхнюю **(ВЛС)** — расположенную над ними;

·на основе суперэлементных преобразований жесткостные свойства подсистем аппроксимируются в виде матриц жесткостей, разрешенных относительно узлов сосредоточения инерционных параметров, сформированных в процессе дискретизации;

·матрица жесткостей нижней подсистемы трансформируется путем определения и введения в нее жесткостных параметров от перемещений опорных узлов [13];

·на основе метода перемещений с использованием сформированных матриц жесткости составляются уравнения равновесия всей системы (**НЛС+сейсмоизоляторы+ВЛС**);

·определяются инерционные параметры присоединенного грунта и инерционные параметры, сосредоточенные в неопорных узлах системы;

·на основе принципа Даламбера формируется система уравнений динамического равновесия дискретной модели, при этом состояние упругопластических элементов описывается в зависимости от параметров взаимного перемещения краевых точек на основе теории Н. Н. Давиденкова [14]; параметры состояния кинематических элементов определяются выражениями, приведенными в таблице 1;

·численно на каждом шаге интегрирования системы дифференциальных уравнений определяются возможные перемещения узлов модели при функции воздействия заданной в виде сейсмограммы землетрясения, определяется траектория перемещений опорных узлов **ВЛС**;

·из анализа полученной траектории по известным критериям определяется бальность сейсмического воздействия на **ВЛС**;

·на основе параметров полученной бальности спектральным методом выполняется динамический расчет **ВЛС.**

Вариант так называемой консольной модели, поясняющей изложенное, приведен на рис. 1.

Предлагаемая методика позволяет избежать процедур определения напряженно-деформированного состояния сооружения на каждом шаге интегрирования, необходимых для определения наихудшего состояния в процессе сейсмического воздействия. Использование прямого интегрирования с применением такой процедуры выливается в тысячи часов расчета модели «средней» размерности и делает расчет практически невозможным.

Программная реализация изложенной методики позволит выполнить реальный расчет с необходимыми сочетаниями нагрузок в течение приемлемого отрезка времени с использованием процедуры нормативно обусловленной спектральной теории расчета сооружений на сейсмические воздействия.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Никонов А.А. Спитакская катастрофа 1988 года — сроки и уроки// электронный научно-информационный журнал "ВЕСТНИК Отделения НАУК О ЗЕМЛЕ РАН" № 1(21)'2003 С.63-67.
2. Fujita T. Progress of Applications, R&D and Design Guidelines for Seismic Isolation of Civil Buildings and Industrial Facilities in Jupan//International Post-Smirt Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Seismic Vibration of Structures, Taormina, Sicily, Italy, 1997. — p.1—24.

3. Naeim F., Kelly J.M. Design of seismic isolated Structures: from theory to practice. USA. 1999. — 290 p.
4. Zhou F.L. Progress of Applications, New Projects, R&D and Development of Design Rules for Base Isolation and Passive Energy Dissipation of Civil Buildings, Bridges and Nuclear and Non-Nuclear Plants in the P.R. China//International Post-Smirt Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Seismic Vibration of Structures, Taormina, Sicily, Italy, 1997. — p.45—56.
5. Назин В.В. Экспериментальные здания в Севастополе на гравитационных системах сейсмоизоляции с включающимся сухим трением: Тезисы докладов республиканской конференции «Сейсмостойкое строительство в Узбекской ССР». — Ташкент: Фан, 1974. С.22-24.
6. Назин В.В. Фундамент сейсмостойкого здания.: А.с. Ш44094, кл. E04H 9/02, E04D 27/34,1972.
7. Курзанов А.М., Ахмедов А.М. Натурные исследования трехэтажного фрагмента и пятиэтажного здания на сейсмоизолирующих опорах//Экспресс-информация ВНИИНТПИ. Сер. Сейсмостойкое строительство. — 1994. — Вып.2—3. — С.24—32.
8. Черепинский Ю.Д., Жунусов Т.Ж, Горвиц И.Г. Активная сейсмозащита зданий и сооружений. — Алма-Ата.: КазНИИНТИ, 1985. — 32с.
9. Черепинский Ю.Д., Филиппов О.Р., Шершнев А.В. Оценка сейсмостойкости крупнопанельных домов на кинематических (КФ) фундаментах//Сб. Исследование сейсмостойкости сооружений. — Алма-Ата: Казахстан, 1982. — Вып. 13(23). — С.82—99.
10. Филлипов А.Т. Многоликий солитон. — М.: Наука. 1990. — 288 с.
11. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение: Пер. с англ. . — М.: Мир, 1990. — 344 с.
12. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечного элемента. - М: Стройиздат, 1982. — 447 с.
13. Гаскин В.В., Снитко А.Н., Соболев В.И. Динамика и сейсмостойкость зданий и сооружений. — Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1992. Ч. 1. Многоэтажные здания. — 216 с.
14. Пальмов В.А. Колебания упруго-пластических тел. — М.: Наука. 1976. — 328 с.

Министерство Образования и Науки Российской Федерации
Иргупс
Министерство Транспорта
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

Раздел 2.

Управление в технических системах.
Моделирование.

Содержание научного журнала:

Инженерная механика
Транспортные средства
Энергетика и электромеханика
Строительство, материалы и конструкции
Охрана окружающей среды
Автоматизация технологических процессов
Современные технологии
Системный анализ
Моделирование технических систем
Транспортные системы
Энергоснабжение и электромеханика
Управление техническими системами
Информационные технологии
Экономика безопасности и качества

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Асташин С.М. УДК 621.311

УЧЕТ ВОЗМУЩЕНИЙ ВО ВНЕШНЕЙ СЕТИ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

При учете электромагнитных и электромеханических переходных процессов система тягового электроснабжения (СТЭ) магистральной железной дороги переменного тока представляет собой сложный нелинейный динамический объект, для формального описания которого может быть использована следующая модель:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{F}_t\left[\mathbf{Y}(t), \mathbf{C}(t), \mathbf{S}(t)\right], \qquad (1)$$

где $\mathbf{X}(t)$ – n-мерный вектор параметров, характеризующих режим СТЭ; $\mathbf{F}_t\left[\mathbf{Y}(t), \mathbf{C}(t), \mathbf{S}(t)\right]^T$ – нелинейный, динамический оператор, в общем случае зависящий от времени; $\mathbf{Y}(t)$ – m-мерный вектор возмущающих воздействий; $\mathbf{C}(t)$ – l-мерный вектор управляющих воздействий; $\mathbf{S}(t)$ – p-мерный вектор структурных параметров СТЭ.

В качестве параметров $\mathbf{X}(t)$ обычно используются декартовые $\left(U_i^{'}, U_i^{''}\right)$ или полярные координаты $\left(U_i, \delta_i\right)$ узловых напряжений. Параметры $\mathbf{Y}(t)$ представляют собой изменяющиеся во времени и перемещающиеся в пространстве активные P_i и реактивные Q_i тяговые нагрузки. Вектор управлений $\mathbf{C}(t)$ формируется на основании детерминированного или случайного графика движения поездов[1]. Структурные параметры $\mathbf{S}(t)$ включают в свой состав в основном элементы матрицы проводимостей, отвечающей электрической сети СТЭ.

Ввиду большой размерности, сложности и недостаточной информационной обеспеченности СТЭ практическое использование модели (1) на современном этапе не представляется возможным. Поэтому для определения режимов СТЭ применяют имитационные методы [1...4]. При этом используется концепция так называемых мгновенных[2] схем [5] и осуществляется редукция динамической модели (1) к набору статических моделей. Для выполнения процедуры моделирования исследуемый интервал T_M разбивается на малые промежутки Δt, внутри которых параметры $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{C}$ и $\mathbf{S}$ принимаются неизменными.

На каждом интервале моделирования Δt осуществляется решение следующей нелинейной системы уравнений, описывающей установившийся режим соответствующей мгновенной схемы:

$$\mathbf{F}\left[\mathbf{X}_k, \mathbf{Y}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{S}_k\right] = 0, \qquad (2)$$

где $\mathbf{X}_k, \mathbf{Y}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{S}_k$ – значения векторов $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{C}, \mathbf{S}$ для k-ой мгновенной схемы.

Описанный алгоритм реализован в комплексе программ Fazonord «Расчеты режимов и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения в фазных координатах» [6]. Однофазная СТЭ связана с рядом других подсистем, активно взаимодействующих друг с другом. К их числу можно отнести трехфазную электроэнергетическую систему (ЭЭС) и районы электроснабжения (РЭС) нетяговых и нетранспортных потребителей. Объединенная система электроснабжения (ОСЭ) железнодорожной магистрали характеризуется

[1] Ниже будет показано, что в состав этого вектора могут входить управляющие воздействия, направленные на коммутацию линий электропередач и изменение режимов работы генераторов, нагрузок и компенсирующих устройств.

[2] Под мгновенными понимаются схемы СТЭ с расположением поездов в определенный момент времени [5].

большой размерностью и сложностью взаимосвязей. Отличительная особенность комплекса Fazonord состоит в возможности подробного описания внешней сети, что позволяет выполнять корректное моделирование ОСЭ с учетом процессов, происходящих во внешней сети, в частности, с учетом коммутаций линий электропередач высокого напряжения и изменений режимов работы генераторов, нагрузок, а также компенсирующих и регулирующих устройств.

В настоящей статье приведены результаты исследований, показывающих актуальность учета возмущений во внешней сети при имитационном моделировании СТЭ. Моделирование проводилось применительно к ОСЭ западного участка Байкало-Амурской железнодорожной магистрали на основе комплекса программ Fazonord. Сформированная в программном комплексе расчетная схема ОСЭ показана на рис. 1. Расчетная схема составлена в предположении включения всех автотрансформаторов системы 2х25 кВ в соответствии с проектом.

Мощности районных нагрузок взяты из результатов контрольных замеров для летнего режима. Для получения сопоставимых результатов во всех вариантах расчета моделировалось движение пакета из трех нечетных поездов массами 3000 т с интервалами в 30 мин. Характер изменения активных и реактивных мощностей, потребляемых таким поездом, по-

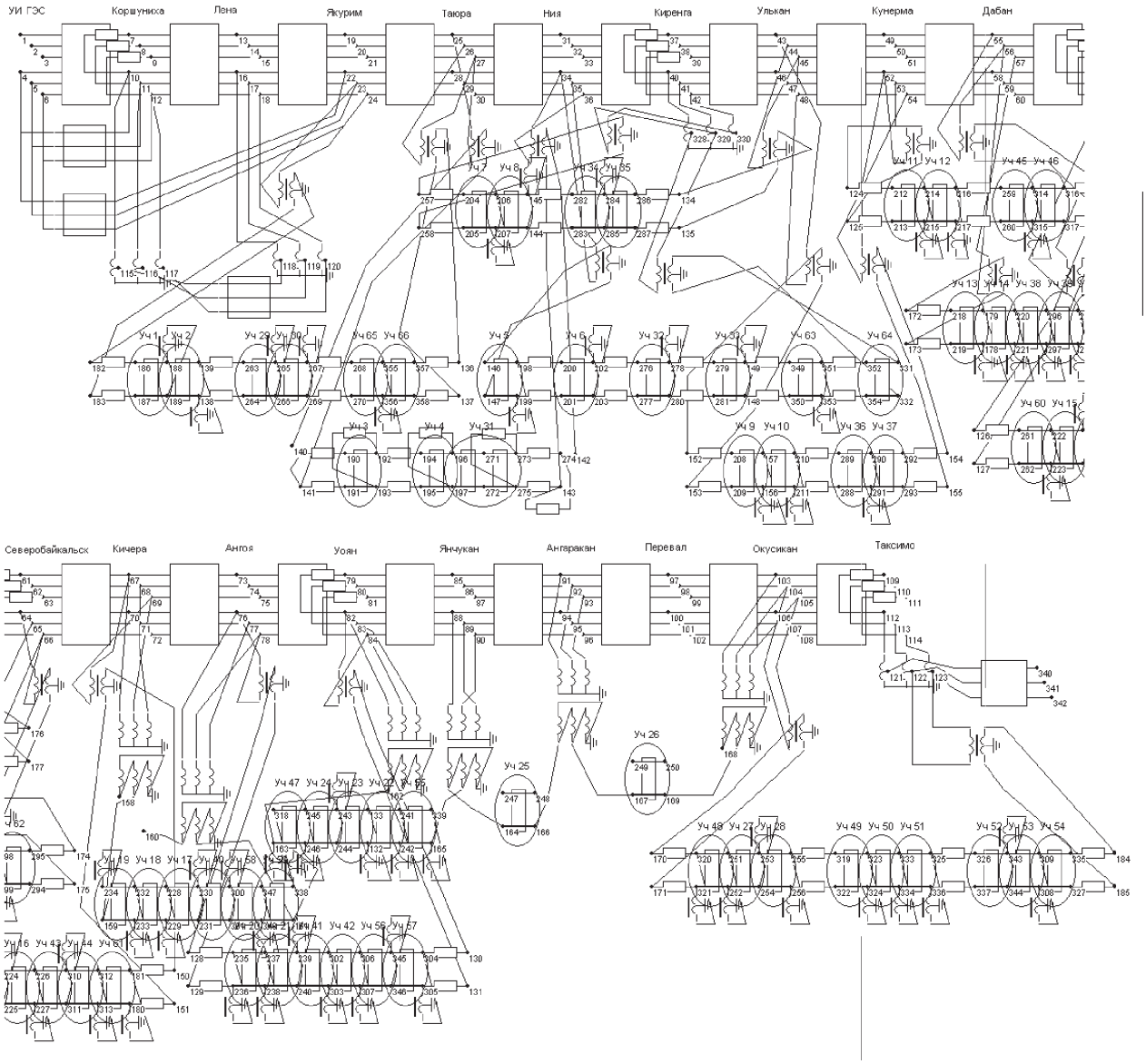


Рис. 1. Расчетная схема ОСЭ.

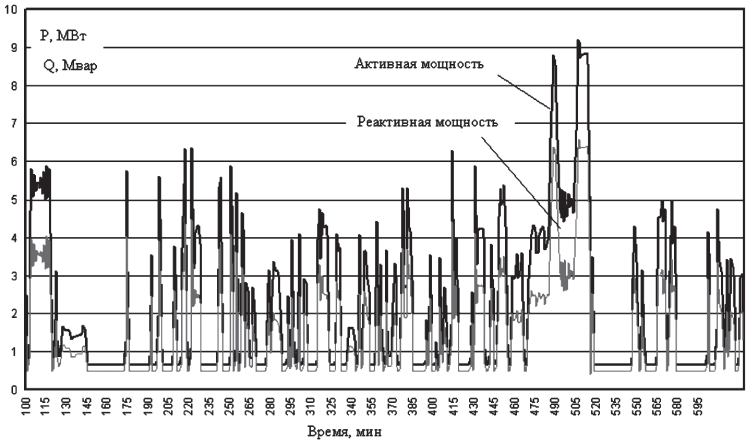


Рис. 2. Активные и реактивные мощности, потребляемые поездом массой в 3000 т.

казан на рис. 2. Шунтирующие реакторы (ШР), установленные на шинах 10 кВ тяговых подстанций (ТП), моделировались с помощью индуктивных шунтов или реактивных нагрузок. Информация о реакторах рассматриваемой ОСЭ представлена в табл. 1. Параметры ШР выбраны по данным контрольных замеров, а также из условия обеспечения напряжения холостого хода в 29 кВ на тяговых шинах подстанций.

С целью изучения влияния возмущений во внешней сети на результаты расчетов имитационное моделирование выполнялось для двух вариантов:

1) нормальная схема внешней сети с двухцепной ЛЭП-220 кВ и включенными реакторами; отключение на 170-й минуте одной цепи ЛЭП 220 кВ между ТП Ангоя и Уоян.

2) нормальная схема внешней сети с двухцепной ЛЭП-220 кВ и включенными реакторами; отключение на 170-й минуте одной цепи ЛЭП 220 кВ между ТП Ангоя и Уоян с одновременным отключением части ШР.

Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4 в виде графиков изменения напряжения на токоприемнике среднего поезда моделируемого пакета.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Возмущения во внешней сети, связанные с коммутациями линий электропередачи и компенсирующих устройств, могут оказывать существенное влияние на режимы систем тягового электроснабжения.

2. Для корректного моделирования СТЭ необходим учет процессов, происходящих во внешней сети, в частности, учет коммутаций линий электропередач высокого напряжения и изменений режимов работы генераторов, нагрузок, а также компенсирующих и регули-

Табл. 1.

Коммутируемые реакторы.

№	Подстанция	Число и мощность включенных реакторов	Эквивалентная проводимость, приведенная к напряжению 220 кВ
1	Киренга	1 х 18 Мвар	372 мкСм
2	Даван	2 х 3.3 Мвар	136 мкСм
3	Северобайкальск	4 х 3.3 Мвар	272 мкСм
4	Кичера	2 х 3.3 Мвар	136 мкСм
5	Ангоя	2 х 3.3 Мвар	136 мкСм
6	Уоян	2 х 3.3 Мвар	136 мкСм
7	Янчукан	4 х 3.3 Мвар	272 мкСм
8	Таксимо	2 х 10 Мвар	414 мкСм

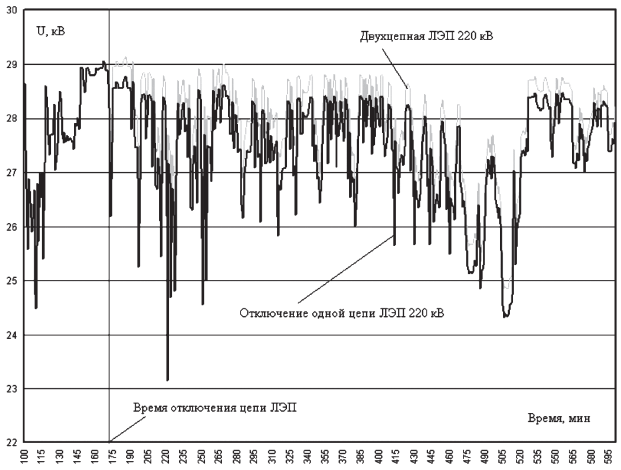


Рис. 3. Напряжение на токоприемнике среднего поезда для первого варианта расчета.

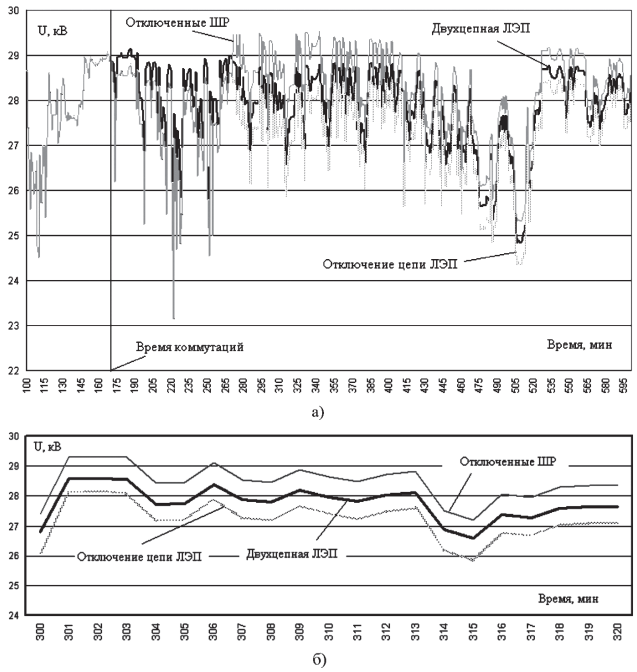


Рис. 4. Напряжение на токоприемнике среднего поезда для второго варианта расчета: а) уплотненный масштаб по оси абсцисс; б) разреженный масштаб по оси абсцисс для интервала времени 300…320 мин.

рующих устройств. Такой учет особенно актуален для железных дорог в регионах Сибири и Дальнего Востока, схемы внешнего электроснабжения которых характеризуются наличием протяженных ЛЭП 110 — 220 кВ, питающих тяговые подстанции.

Заключение.

Разработана методика учета возмущений во внешней сети при имитационном моделировании систем тягового электроснабжения. Результаты компьютерного моделирования, проведенные применительно к системе электроснабжения западного участка Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, показали применимость предлагаемой методики для решения практических задач, связанных с определением режимов и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения переменного тока.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Тер-Оганов, Э.В. Имитационная модель работы системы электроснабжения двухпутного электрифицированного участка [Текст] / Э.В. Тер-Оганов // Сб. научн. тр. ВЗИИТ. — 1983. — Вып. 788.
2. Герман, Л.А. Схема замещения электрифицированного участка железной дороги переменного тока [Текст] / Л.А. Герман // Электричество. — 1988. — № 3. — С. 71-75.
3. Дынькин, Б.Е. Алгоритм и программа имитационного моделирования системы тягового электроснабжения на ЭВМ [Текст] / Б.Е. Дынькин, Л.Н. Рачек, С.Ю. Поступаев // Вопросы повышения эффективности устройств тягового электроснабжения в условиях Дальнего Востока и БАМ. — 1989. — С. 10-16.
4. Закарюкин, В.П. Имитационное моделирование систем тягового электроснабжения [Текст] / Закарюкин В.П., Крюков А.В. — Иркутск: ИрГУПС, 2007 — 124 с.
5. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К.Г. Марквардт. — М.: Транспорт, 1982. — 528 с.
6. «Fazonord — Расчеты режимов и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения в фазных координатах». Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2005611179 (РФ) / Закарюкин В.П., Крюков А.В., Литвинов Е.Ю. — Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. — Зарегистр. 19.05.2005.

Шаманов В.И., Пультяков А.В.

УДК 656.25.071.84: 62-50.007.0045

МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Системы автоматики, в том числе и на железных дорогах, относятся к долгоживущим сложным техническим системам, в процессе использования которых по назначению в полной мере проявляются деградационные процессы (износ, разрегулирование, старение, расстройка), вызывающие необратимое накопление повреждений, что требует проведения профилактического обслуживания и ремонтных работ. Решение задачи сокращения расходов на эксплуатацию технических систем при обеспечении требуемого качества их функционирования требует знания закономерностей поведения и изменения состояния устройств, входящих в эти системы.

Использование математического аппарата цепей Маркова позволяет описывать поведение как больших технических систем любого типа и назначения [1, 8], так и устройств, входящих в них [4]. Однако надежность системы при проявлении деградационных процессов лучше описывается так называемыми «стареющими законами», учитывающими далекую предысторию [2]. Марковскую аппроксимацию процессов старения можно обеспечить за счет нелинейного преобразования — квантования по уровню случайных функций, характеризующих изменение во времени обобщенного параметра устройства или системы [3].

Нелинейное преобразование вполне естественно для устройств автоматики, так как при их техническом обслуживании параметры измеряются в дискретные, и, как правило, равноотстоящие моменты времени. Обычно считается, что Марковская цепь описывает переходный режим некоторой системы на одинаковых интервалах времени [7]. Это позволяет использовать цепи Маркова для исследования «поведения» или изменения состояний устройств автоматики на всем времени эксплуатации.

Цепь Маркова описывает последовательность состояний системы, в каждое из которых данная система может попасть независимо от предшествующего состояния, причем одновременно она не может находиться более чем в одном состоянии. Все возможные состояния системы образуют полную группу несовместных событий.

Вероятность перехода системы или устройства из одного состояния в другое (переходная вероятность) является условной вероятностью того, что система из состояния i через определенный промежуток времени перейдет в состояние j, при этом система может «перейти» в то же состояние, то есть остаться в прежнем состоянии. Вероятности переходов являются стационарными, не изменяющимися во времени.

Вероятности переходов принято представлять в виде матрицы переходов системы или устройства, которая содержит все переходные вероятности, фиксированные и не зависящие от времени. Матрица переходных вероятностей совместно с исходными вероятностями состояний полностью задает Марковскую цепь [7].

На рис. 1 представлена разработанная обобщенная Марковская модель процесса технического обслуживания и ремонта устройств автоматики. В данной модели приняты следующие обозначения состояний.

1. Н — новое состояние — это работоспособное состояние, когда все контролируемые параметры устройства находятся в пределах, предписываемых для момента пуска в эксплуатацию. В это состояние попадают устройства автоматики с завода или после капитального ремонта. Данное состояние - это период приработки, во время которого проявляются скрытые дефекты.

2. С — стареющее состояние при котором устройства автоматики находятся в работоспособном состоянии, и все контролируемые

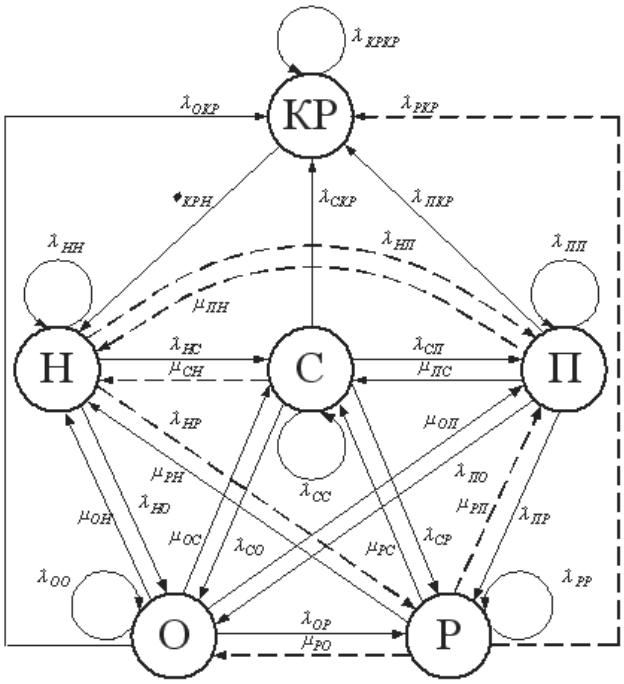


Рис. 1. Обобщенная модель процесса технического обслуживания и ремонта устройств автоматики.

параметры, характеризующие способность выполнять заданные функции и определяющие данное состояние, находятся в области допустимых значений. Данное состояние наступает после окончания периода приработки и включает в себя весь период нормальной эксплуатации.

3. П — предотказное состояние, когда один или несколько из контролируемых параметров устройства достигают области критических значений, но устройство в этом состоянии остается работоспособным.

4. О — состояние отказа, при котором устройства автоматики находятся в неработоспособном состоянии, причем это состояние может быть как защитным, так и опасным [6].

5. Р — состояние текущего ремонта, в которое устройства автоматики попадают либо во время устранения отказов, либо при техническом обслуживании, когда требуется замена или восстановление каких-либо узлов или деталей. Текущей ремонт можно считать неотъемлемой составной частью процесса технического обслуживания устройств автоматики.

6. КР — состояние капитального ремонта, в которое устройства автоматики выводятся по графикам замены в сроки, указанные в технической документации на устройство.

В данную систему состояний устройство попадает сразу после ввода в эксплуатацию через новое состояние. Выход из данной системы состояний возможен из любого состояния и означает замену устройства для списания.

Переходы между возможными состояниями данной модели, обозначенные $\lambda_{НС}, \lambda_{НР}, \lambda_{НО}, \lambda_{НП}, \lambda_{СП}, \lambda_{СО}, \lambda_{СР}, \lambda_{ПО}, \lambda_{ПР}, \lambda_{ОР}, \lambda_{СКР}, \lambda_{ПКР}, \lambda_{РКР}, \lambda_{ОКР}$ являются интенсивностями старения, отказов, предотказов, проведения текущего ремонта, вывода устройства на капитальный ремонт и ввод в эксплуатацию устройства после капитального ремонта. Интенсивности отказов включают в себя интенсивности всех возможных видов как защитных, так и опасных отказов — внезапных, постепенных, приработочных и послепрофилактических.

Обратные переходы между состояниями, обозначенные $\mu_{СН}, \mu_{ПН}, \mu_{ПС}, \mu_{ОС}, \mu_{ОН}, \mu_{ОП}, \mu_{РН}, \mu_{РС}, \mu_{РП}, \mu_{РО}, \mu_{КРН}$ являются интенсивностями восстановлений после отказов и профилактических работ при регламентном техническом обслуживании.

Дуги графа с возвращением в то же состояние соответствуют случаям, когда между очередными проверками состояние контролируемых параметров состояний объекта осталось в прежнем дискретном состоянии из рассматриваемых. Эти переходы обозначены $\lambda_{НН}, \lambda_{СС}, \lambda_{ПП}, \lambda_{ОО}, \lambda_{РР}, \lambda_{КРКР}$.

В данной модели существуют маловероятные переходы, обозначенные пунктирными

линиями. Для упрощения модели и расчетных формул эти переходы можно не рассматривать, то есть значения этих интенсивностей переходов можно принимать равными нулю.

Матрица интенсивностей переходов между состояниями, в соответствии с принятыми обозначениями интенсивностей и с учетом малой вероятности некоторых переходов имеет следующий вид:

$$\lambda = \begin{Vmatrix} \lambda_{НН} & \lambda_{НС} & \lambda_{НП} & \lambda_{НО} & \lambda_{НР} & 0 \\ \mu_{СН} & \lambda_{СС} & \lambda_{СП} & \lambda_{СО} & \lambda_{СР} & \lambda_{СКР} \\ \mu_{ПН} & \mu_{ПС} & \lambda_{ПП} & \lambda_{ПО} & \lambda_{ПР} & \lambda_{ПКР} \\ \mu_{ОН} & \mu_{ОС} & \mu_{ОП} & \lambda_{ОО} & \lambda_{ОР} & \lambda_{ОКР} \\ \mu_{РН} & \mu_{РС} & \mu_{РП} & \mu_{РО} & \lambda_{РР} & \lambda_{РКР} \\ \mu_{КРН} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{КРКР} \end{Vmatrix}. \quad (1)$$

Математическая модель рассматриваемого процесса изменения состояний во времени включает в себя вектор-столбец, задающий вероятностное распределение состояний в нулевой момент времени, и стохастическую матрицу вероятностей переходов из одного состояния в другое. Вектор-столбец вероятностей состояний в нулевой момент времени имеет следующий вид:

$$P(0) = \begin{Vmatrix} P_Н(0) \\ P_С(0) \\ P_П(0) \\ P_О(0) \\ P_Р(0) \\ P_{КР}(0) \end{Vmatrix}. \quad (2)$$

Матрица вероятностей переходов между состояниями, выглядит следующим образом:

$$P = \begin{Vmatrix} P_{НН} P_{НС} P_{НП} P_{НО} P_{НР} 0 \\ P_{СН} P_{СС} P_{СП} P_{СО} P_{СР} P_{СКР} \\ P_{ПН} P_{ПС} P_{ПП} P_{ПО} P_{ПР} P_{ПКР} \\ P_{ОН} P_{ОС} P_{ОП} P_{ОО} P_{ОР} P_{ОКР} \\ P_{РН} P_{РС} P_{РП} P_{РО} P_{РР} P_{РКР} \\ P_{КРН} 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ P_{КРКР} \end{Vmatrix}. \quad (3)$$

Численные значения членов матрицы вероятностей переходов из одного состояния в другое зависят от качества изготовления устройства, интенсивности и условий эксплуатации, а также от качества выполнения профилактических и ремонтных работ и от стратегии поведения обслуживающего персонала. Стратегии различаются объемом и местом проведения работ, обеспечивающих повышение качества функционирования устройств автоматики.

Для практического применения наиболее удобны эргодические матрицы, у которых из каждого состояния можно попасть в любое другое состояние, и предельные значения вероятностей состояний не зависят от начальных условий. Матрица-строка предельных вероятностей для эргодических цепей может быть найдена, в соответствии с теоремой Маркова [5], возведением матрицы переходов в достаточно большую степень.

Так удобно описывать процессы, которые развиваются естественным образом, без вмешательства извне. Если на каждом шаге принимать решение (управление) о переводе системы в другое конкретное состояние, то процесс становится управляемым. В случаях, когда выбираемое управление в конкретный момент времени зависит только от значения процесса в этот момент и не зависит от времени, управление становится Марковским однородным.

Для определения вероятностей каждого из состояний можно использовать систему дифференциальных уравнений, предложенную академиком А.Н. Колмогоровым. Для этого необходимо использовать значения интенсивностей переходов между состояниями, подставляя их в соответствующие уравнения.

Таким образом, разработана обобщенная модель процесса технического обслуживания и ремонта устройств автоматики, которая позволяет строить частные модели этого процесса для конкретных устройств с учетом специфики их работы и особенностей проявления отказов в них. Модель дает возможность вывода расчетных формул для определения вероятностей пребывания устройств в каждом из рассматриваемых состояний.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высшая школа, 1982. — 231 с.
2. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. — М.: Наука, 1985. — 328 с.

3. Богданофф Дж., Козин Ф. Вероятностные испытания повреждений. — М.: Мир, 1989. — 344 с.
4. Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Константиновский В.В. Элементы теории оптимального обслуживания технических изделий. — Минск: Наука и техника, 1974. — 192 с.
5. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые технические задачи. — М.: Советское радио, 1973. — 232 с.
6. Лисенков В.М. Статистическая теория безопасности движения поездов. М.: ВИНИТИ РАН, 1999. — 332 с.
7. Таха Х. Введение в исследование операций: В 2-х книгах. Кн. 2. М.: Мир, 1985. — 496 с.
8. Шаманов В.И. Теория и методы управления технической эксплуатацией систем интервального регулирования движения поездов. Дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. — Иркутск: 1998. — 419 с.

Кузнецов Н.К., Перелыгина А. Ю.

УДК 621.01:534

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМИ НА ОСНОВЕ ТРЕХМАССОВОЙ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

В современном автоматизированном производстве все большее применение находят технологические машины с автоматическим управлением: станки с программным управлением, промышленные роботы и манипуляторы, подъёмные машины, транспортирующие, ориентирующие и загрузочные устройства, координатные и поворотные столы и т.д. В отличие от цикловых машин, предназначенных для реализации явно выраженного установившегося движения, управляемые машины позволяют осуществлять механическое движение любой сложности, в том числе и управляемые переходные режимы. Рост рабочих скоростей и нагрузок этих машин и ужесточение показателей точности и надёжности их функционирования предъявляют высокие требования к уровню динамических расчётов, вызывают необходимость учёта податливости исполнительных механизмов и разработки методов и средств снижения упругих колебаний. Эффективным путем решения этой проблемы является использование активного способа гашения собственных колебаний управляемых механических систем, обладающего более широкими возможностями настройки и регулирования параметров.

Согласно [1] колебательные движения по некоторым степеням подвижности исполнительных механизмов могут быть описаны трехмассовой колебательной системой. Учет промежуточной массы в этой системе затрудняет возможности динамического анализа и синтеза систем управления колебаниями из-за высокого порядка дифференциальных уравнений движения. В работе [2, 3] на примере пропорциональной дополнительной обратной связи было показано, что эффективным способом гашения упругих колебаний подобных систем является их активная компенсация. В настоящей статье приводятся исследования условий эффективности активного способа управления колебаниями на основе трехмассовой расчетной схемы.

Важнейшей характеристикой системы гашения колебаний является ее эффективность. Система гашения эффективна, если она уменьшает интенсивность возникающих в системе колебаний. Для определения эффективности системы гашения применяются интегральные квадратичные оценки упругих колебаний, которые дают наиболее сжатое и четкое представление о характере колебательных движений. Коэффициент эффективности системы гашения может быть выражен:

$$K_{J0} = \frac{J}{J_0}, \qquad (1)$$

где $J_0 = \int_0^\infty \Delta q_0^2(t)dt$, $J = \int_0^\infty \Delta q^2(t)dt$ - интегральные квадратичные оценки исходной колебательной системы и системы с дополнительной связью. Если $K_{J0} < 1$, то система является эффективной по интегралу от квадрата упругой деформации. Интегралы проще всего определяются с помощью теоремы Релея:

$$J_0 = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty \left|\Delta G_0(j\omega)\right|^2 d\omega; \; J = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty \left|\Delta G(j\omega)\right|^2 d\omega, \qquad (2)$$

где $\Delta G_0(j\omega), \Delta G(j\omega)$ - амплитудные спектры упругих деформаций (преобразование Фурье от $\Delta q_0(t)$ и $\Delta q(t)$).

Вычисление интегралов (2) для дробно—рациональных функций производится с помощью специальных таблиц [4]. Используя выражения (2), можно определить наиболее эффективную структуру и параметры дополнительных связей.

Расчетная схема трехмассовой колебательной системы, построенная на основе обобщенной расчетной схемы [1], показана на рис. 1. Здесь приняты следующие обозначения: q_* — координата, характеризующая движение привода; $\Delta q_1, \Delta q_2$ — упругие смещения масс; m_n, m_1 — соответственно приведенные массы привода и элементов преобразования движения; m — приведенные массы упругого звена, схвата и груза; Q_n — приведенная движущая сила привода; c_1 — приведенный коэффициент жесткости элементов преобразования движения; c — приведенный коэффициент жесткости несущего схвата; b — коэффициент вязкого трения.

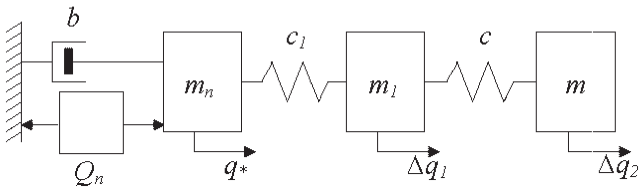


Рис.1. Трехмассовая расчетная схема колебательной системы.

Дифференциальные уравнения движения трехмассовой системы для режима позиционирования в окрестности некоторого заданного положения имеют вид

$$m_n\ddot{q}_* + b\dot{q}_* - c_1\Delta q_1 = Q_n - W'_{gon}(p)\Delta q; \qquad (3)$$

$$m_1\Delta\ddot{q}_1 + c_1\Delta q_1 = -m_1\ddot{q}_* + c\Delta q_2 - W''_{gon}(p)\Delta q; \qquad (4)$$

$$m\Delta\ddot{q}_2 + c\Delta q_2 = -m\ddot{q}_* - m\Delta\ddot{q}_1. \qquad (5)$$

Преобразуя по Лапласу при нулевых начальных условиях уравнения (3)-(5), построим структурную схему, приведенную на рис. 2, где показаны дополнительные обратные связи с передаточной функцией $W'_{gon}(p)$, охватывающая привод и механическую передачу системы, и передаточной функцией $W''_{gon}(p)$, охватывающая только механическую передачу.

Из структурной схемы видно, что для трехмассовой системы возможны три варианта управления колебаниями: по координате упругого отклонения передаточного механизма Δq_1, по координате упругого отклонения исполнительного механизма Δq_2, и суммарным упругим колебаниям робота $\Delta q = \Delta q_1 + \Delta q_2$. На примере пропорциональной дополнительной

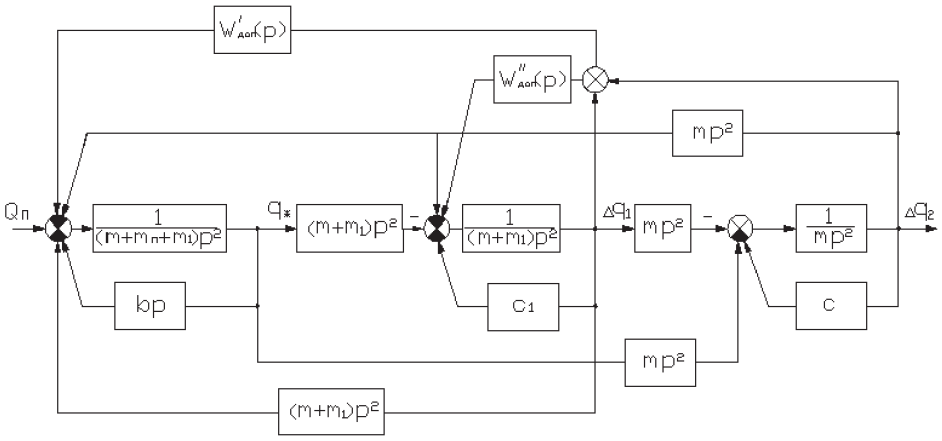


Рис.2. Структурная схема трехмассовой системы с дополнительной связью.

связи $W_{gon}(p)=\pm k_D$ исследуем условия эффективности каждого варианта управления колебаниями трехмассовой системы, формируемого на первую массу (привод) трехмассовой системы. По структурной схеме найдем передаточную функцию при отсутствии дополнительной связи, которая при переходе к новым обозначениям имеет вид

$$W_0(p)=\frac{\Delta q_0(p)}{Q_0(p)}= \\ =-\frac{b_1p^3+b_3p}{a_0p^5+a_1p^4+a_2p^3+a_3p^2+a_4p+a_5}, \quad (6)$$

где $b_1=m_n^{-1}$, $b_3=[\omega_1^2n_2^{-1}(1-n_1)+\omega_0^2]m_n^{-1}$; $a_0=1$;

$$a_1=\mu; a_2=\omega_1^2n_2^{-1}(1-n_1)+\omega_0^2n_1^{-1}(1-n_3);$$

$$a_3=\mu\cdot[\omega_1^2n_2^{-1}(1-n_1)+\omega_0^2]; a_4=\omega_0^2\omega_1^2n_1^{-1};$$

$$a_5=\mu\omega_0^2\omega_1^2; Q_0={}^{Q_n}\!/_{m_n}; \omega_0^2={}^{c_1}\!/_{m_1}; \omega_1^2={}^{c}\!/_{m};$$

$$\mu={}^{b}\!/_{m_n}; n_1={}^{m_n}\!/_{M}; n_2={}^{m_1}\!/_{M}; n_3={}^{m}\!/_{M};$$

$$M=m_n+m_1+m; p=d/dt.$$

Упругие колебания, возникающие в системе в результате приложения движущей силы $Q_0(p)$ при отсутствии дополнительной связи, определяются выражением

$$\Delta q_0=\Delta q_{10}+\Delta q_{20}=W_0(p)Q_n, \quad (7)$$

а упругие колебания при наличии дополнительной связи $w_{gon}(p)={}^{W_{gon}(p)}\!/_{m_n}$ выражением

$$\Delta q(p)=\frac{W_0(p)Q_n}{1+W_0(p)w_{gon}(p)}. \quad (8)$$

Задавая входное воздействие в виде ступенчатого сигнала $Q_n=Q_0\cdot 1(t)$, и используя табулированные зависимости квадратичных функционалов от коэффициентов дробно-рациональных функций [4], на основе (6) получим интегральный функционал исходной системы

$$J_0=\frac{Q_0^2n_1F}{2\mu\omega_0^2\omega_1^2n_2n_3}, \quad (9)$$

где $F=\omega_0^2n_2+\omega_1^2n_3$.

Согласно [4] для варианта управления колебаниями трехмассовой системы по координате упругого отклонения передаточного механизма Δq_1 на основе уравнения (8) интегральный функционал имеет вид

$$J_1=\frac{Q_0^2\cdot n_1\cdot F}{2\cdot\mu\cdot n_3\cdot\omega_1^2\cdot(\omega_0^2\cdot n_2\pm k_{D1}\cdot n_1)}. \quad (10)$$

Условие эффективности этой связи с учетом выражений (9) и (10) примет вид

$$k_{10}=\frac{J_1}{J_0}=\frac{\omega_0^2\cdot n_2}{(\omega_0^2\cdot n_2\pm k_{D1}\cdot n_1)}. \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показывает, что отрицательная (нижний знак) дополнительная связь неэффективна ($k_{10}>1$), а положительная - эффективна ($k_{10}<1$), причем эффективность последней зависит от частоты собственных колебаний ω_0 (чем меньше ω_0, тем выше эффективность) и соотношений между массами системы n_1, n_2 (связь эффективнее при условии $n_1>n_2$). Анализ устойчивости системы с дополнительной связью этого типа, согласно критерию Гурвица, показывает, что система устойчива для любых положительных и неустойчива для отрицательных значений коэффициента усиления дополнительной связи.

Квадратичный функционал и условие эффективности для случая управления колебаниями по координате упругого отклонения исполнительного механизма Δq_2 определяются следующими выражениями

$$J_2= \\ =\frac{Q_0^2n_1\mp n_1k_{D2}[\omega_1^2(n_1-1)-\omega_0^2n_2]-\omega_0^2n_2F}{2\mu\omega_0^2n_2n_1^2k_{D2}^2\mp n_1k_{D2}[\omega_1^2(n_1-1)+\omega_0^2n_2]-\omega_0^2\omega_1^2n_2n_3}, \quad (12)$$

$$k_{20}=\frac{\omega_1^2n_3\mp n_1k_{D2}[\omega_1^2(n_1-1)-\omega_0^2n_2]-\omega_0^2n_2F}{Fn_1^2k_{D2}^2\mp n_1k_{D2}[\omega_1^2(n_1-1)+\omega_0^2n_2]-\omega_0^2\omega_1^2n_2n_3}. \quad (13)$$

Как следует из соотношения (13), пропорциональная дополнительная связь, формируемая по координате Δq_2, эффективна только при положительном коэффициенте усиления $k_{D2}>0$. Причем ее эффективность зависит не только от величины коэффициента усиления k_{D2}, но и от частот собственных колебаний ω_0,ω_1. Она будет тем эффективнее, чем ниже собственная частота ω_1 и больше частота ω_0 ($\omega_0>\omega_1$). В то же время эффективность дополнительной обратной связи зависит от соотношений между массами системы n_1, n_2, n_3; она повышается при выполнении условия $n_3>n_1>n_2$. Анализ устойчивости системы с данной дополнительной связью показывает, что коэффициент усиления ограничен:

$$k_{D2}^{пр}=\frac{\omega_1^2(n_1-1)+\omega_0^2n_2}{2n_1}+ \\ +\frac{\sqrt{n_2\omega_0^2F+\omega_1^4(n_1-1)^2+\omega_0^2\omega_1^2n_2n_3-2\omega_0^2\omega_1^2n_2^2}}{2n_1}. \quad (14)$$

Определим оптимальное значение коэффициента усиления пропорциональной допол-

нительной обратной связи, которое обеспечит минимальную интегральную оценку (12) и, соответственно, минимальное время переходного процесса отклонения исполнительного механизма от положения равновесия. Для этого частную производную функционала J_2 по коэффициенту k_{D2} приравняем нулю и решим относительно последнего полученное выражение:

$$k_{D2}^{opt} = \frac{\omega_0^2 n_2 (F - \omega_1^2 n_2)}{n_1 (F + \omega_1^2 n_2)}. \qquad (15)$$

Зависимость (15) показывает, что при изменениях собственных частот колебаний ω_0, ω_1 и коэффициентов n_1, n_2, n_3, вызванных изменениями конфигурации исполнительных органов, будут изменяться значения оптимального коэффициента k_{D2}^{opt}.

Сравним эффективность управления колебаниями трехмассовой системы по координате Δq_1 и координате Δq_2, используя выражения (10) и (12):

$$k_{21} = \frac{J_2}{J_1} = \frac{n_3 \cdot \omega_1^2 \cdot (\omega_0^2 \cdot n_2 + k_{D1} \cdot n_1)}{F \omega_0^2 n_2} \times$$
$$\times \frac{-n_1 k_{D2} [\omega_1^2 (n_1 - 1) - \omega_0^2 n_2] - \omega_0^2 n_2 F}{n_1^2 k_{D2}^2 - n_1 k_{D2} [\omega_1^2 (n_1 - 1) + \omega_0^2 n_2] - \omega_0^2 \omega_1^2 n_2 n_3}. \qquad (16)$$

Из соотношения (16) следует, что вариант управления колебаниями по координате Δq_2 эффективнее управления по координате Δq_1 при выполнении условия

$$k_{D1} \omega_1^2 n_3 [n_1 k_{D2} (\omega_1^2 n_2 + F) - \omega_0^2 n_2 F] <$$
$$< k_{D2} n_2 \omega_0^2 [n_1 F k_{D2} - \omega_0^2 n_2 (F - \omega_1^2 n_2)].$$

В противном случае более эффективным случаем оказывается управление по координате Δq_1.

Для случая управления колебаниями трехмассовой системы по суммарным упругим колебаниям Δq интегральный функционал имеет вид

$$J_3 = \frac{Q_0^2 n_1 [\mp \omega_1^2 n_1 k_{D3} + \omega_0^2 F]}{2\mu [-\omega_1^2 n_1^2 k_{D3}^2 \pm n_1 \omega_0^2 k_{D3} (F - \omega_1^2 n_2) + \omega_1^2 \omega_0^4 n_2 n_3]}. \qquad (17)$$

Условие эффективности этой связи с учетом выражений (9) и (17) примет вид

$$k_{30} = \frac{\omega_0^2 \cdot \omega_1^2 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot [\mp \omega_1^2 n_1 k_{D3} + \omega_0^2 F]}{F \cdot [-\omega_1^2 n_1^2 k_{D3}^2 \pm n_1 \omega_0^2 k_{D3} (F - \omega_1^2 n_2) + \omega_1^2 \omega_0^4 n_2 n_3]}. \qquad (18)$$

Из выражения (18) следует, что при $k_{D3} > 0$ соблюдается условие $k_{30} < 1$, которое показывает, что положительная пропорциональная связь всегда эффективна. Пропорциональная дополнительная обратная связь более эффективна при условии $\omega_0 < \omega_1$, в противном случае эффективность данной связи ниже. С увеличением коэффициента n_3 положительная дополнительная связь становится более эффективной $(k_{30} < 1)$.Исследования устойчивости системы показывают, что предельной значение коэффициента усиления этой связи ограничено величиной

$$k_{D3}^{np} = \frac{\omega_0^2}{2 n_1 \omega_1^2} \cdot \Big\{ F - n_2 \omega_1^2 +$$
$$+ \sqrt{n_2 \omega_0^2 F + \omega_1^4 (n_1 - 1)^2 + \omega_0^2 \omega_1^2 n_2 n_3 - 2 \omega_0^2 \omega_1^2 n_2^2} \Big\}. \qquad (19)$$

Определим оптимальное значение коэффициента усиления положительной пропорциональной обратной связи, обеспечивающее наибольшую эффективность гашения колебаний:

$$k_{D3}^{opt} = \frac{\omega_0^2}{n_1 \omega_1^2} \cdot \left[F \pm n_2 \omega_0 \omega_1 \right]. \qquad (20)$$

Из выражения (20) следует, что величина оптимального коэффициента усиления k_{D3}^{opt} также является функцией параметров системы ω_0, ω_1 и коэффициентов n_1, n_2, n_3.

$$k_{31} = \frac{J_3}{J_1} =$$
$$= \frac{n_3 \omega_1^2 [-\omega_1^2 n_1 k_{D3} + \omega_0^2 F] (\omega_0^2 \cdot n_2 + k_{D1} \cdot n_1)}{F [-\omega_1^2 n_1^2 k_{D3}^2 + n_1 \omega_0^2 k_{D3} (F - \omega_1^2 n_2) + \omega_1^2 \omega_0^4 n_2 n_3]}. \qquad (21)$$

Управление колебаниями трехмассовой системы по координате Δq с положительной пропорциональной обратной связью оказывается эффективнее управления по координате Δq_1 с положительным коэффициентом усиления при выполнении условия:

$$k_{D1} \omega_1^2 n_3 (\omega_0^2 F + \omega_1^2 n_1 k_{D3}) <$$
$$< \omega_1^2 n_1 F k_{D3}^2 - \omega_0^2 k_{D3} (\omega_0^2 \omega_1^2 n_2^2 - F^2).$$

Иначе будет наиболее эффективно управление по координате упругого отклонения передаточного механизма Δq_1.

Произведем сравнение эффективности управления колебаниями по координатам Δq и Δq_2, используя соотношение:

$$k_{32}=\frac{\omega_0^2 n_2[-\omega_1^2 n_1 k_{D3}+\omega_0^2 F]}{[-\omega_1^2 n_1^2 k_{D3}^2+n_1\omega_0^2 k_{D3}(F-\omega_1^2 n_2)+\omega_1^2\omega_0^4 n_2 n_3]}\cdot$$
$$\cdot\frac{n_1^2 k_{D2}^2-n_1 k_{D2}[\omega_1^2(n_1-1)+\omega_0^2 n_2]-\omega_0^2\omega_1^2 n_2 n_3}{-n_1 k_{D2}[\omega_1^2(n_1-1)-\omega_0^2 n_2]-\omega_0^2 n_2 F}. \quad (22)$$

Из соотношения (22) следует, что положительная пропорциональная связь, формируемая по суммарным отклонениям, эффективнее положительной связи по координате упругого отклонения исполнительного механизма при выполнении условия:

$$-n_1 k_{D2}[\omega_1^2(n_1-1)-\omega_0^2 n_2]-\omega_0^2 n_2 F\times$$
$$\times[-\omega_1^2 n_1^2 k_{D3}^2+n_1\omega_0^2 k_{D3}(F-\omega_1^2 n_2)+\omega_1^2\omega_0^4 n_2 n_3]>$$
$$>\omega_0^2 n_2[-\omega_1^2 n_1 k_{D3}+\omega_0^2 F]\times$$
$$\times n_1^2 k_{D2}^2-n_1 k_{D2}[\omega_1^2(n_1-1)+\omega_0^2 n_2]-\omega_0^2\omega_1^2 n_2 n_3.$$

Аналогичным образом проанализируем условия эффективности каждого варианта управления колебаниями трехмассовой системы, формируемого на промежуточную массу трехмассовой системы.

Квадратичный функционал и условие эффективности при управлении по координате Дq_1 определяется следующими выражениями:

$$J_4=\frac{Q_0^2 n_1(F\mp k_{D4}n_1)}{2\mu\omega_0^2\omega_1^2 n_2 n_3}; \quad (23)$$

$$k_4=\frac{J_4}{J_0}=\frac{F\mp k_{D4}n_1}{F}. \quad (24)$$

Из выражения (24) следует, что пропорциональная дополнительная связь при формировании компенсирующего воздействия по координате Δq_1 на промежуточную массу эффективна $k_{40}<1$ только при положительном (верхний знак) коэффициенте усиления. Интересно отметить, что эффективность этой связи зависит от соотношения между инерционностью звеньев n_2, n_3 и привода системы n_1. С возрастанием n_1 положительная дополнительная связь становится более эффективной. Установлено, что система с дополнительной связью этого типа будет устойчива при условии $k_{D4}<\omega_0^2$.

Произведем сравнение эффективности положительной пропорциональной дополнительной связи, формируемой на промежуточную массу m_1, и положительной пропорционально связи, воздействующей на привод m_n системы, используя функционалы J_1 и J_4:

$$k_{41}=\frac{J_4}{J_1}=\frac{(F-k_{D4}n_1)(\omega_0^2 n_2+k_{D1}n_1)}{\omega_0^2 n_2 F}. \quad (25)$$

Согласно соотношению (23), пропорциональная дополнительная обратная связь, охватывающая только механическую передачу, эффективнее ($k_{41}<1$) связи, охватывающей привод и механическую передачу, когда соблюдается условие $k_{D1}n_1(F-k_{D4}n_1)<k_{D4}n_2\omega_0^2$. Причем её эффективность зависит не только от величины коэффициента усиления k_{D4}, но и от параметров трехмассовой системы. Дополнительная обратная связь, охватывающая механическую передачу, более эффективна, когда инерционность промежуточной массы больше инерционности привода и исполнительного механизма ($n_2>n_1>n_3$). При условии, если собственная частота элементов преобразования движения ω_0 меньше собственной частоты упругого звена ω_1, положительная дополнительная связь более эффективна, чем при условии $\omega_0>\omega_1$.

Для случая управления колебаниями трехмассовой системы по координате Δq_2 интегральный функционал имеет вид

$$J_5=\frac{Q_0^2 n_1(F\pm k_{D5}n_1)}{2\mu\omega_0^2 n_2(\omega_1^2 n_3\pm k_{D5}n_1)}. \quad (26)$$

Условие эффективности этой связи с учетом выражений (9) и (26) примет вид

$$k_{50}=\frac{J_5}{J_0}=\frac{(F\pm k_{D5}n_1)\omega_1^2 n_3}{F(\omega_1^2 n_3\pm k_{D5}n_1)}. \quad (27)$$

Зависимость (27) показывает, что при $k_D>0$ соблюдается условие $k_{50}<1$, которое показывает, что положительная пропорциональная связь всегда эффективна. Причем ее эффективность зависит от соотношений между массами системы n_1, n_2, n_3; она повышается при больших значениях n_2 и n_3, и меньшей инерционности привода n_1. Эффективность положительной пропорциональной дополнительной связи зависит и от частот собственных колебаний ω_0, ω_1. Она будет тем эффективнее, чем ниже собственная частота ω_1 и больше частота ω_0. Как показывают исследования, величина коэффициента усиления данной связи не ограничена условиями устойчивости.

Для рассматриваемого случая введения компенсирующего воздействия сравним эффективность управления колебаниями трех-

массовой системы по координате $Дq_1$ и координате $Дq_2$, используя выражения (23) и (26):

$$k_{54} = \frac{J_5}{J_4} = \frac{(F + k_{D5} n_1)\omega_1^2 n_3}{(\omega_1^2 n_3 + k_{D5} n_1)(F - k_{D4} n_2)}. \quad (28)$$

Из соотношения (28) следует, что вариант управления колебаниями по координате $Дq_2$ эффективнее управления по координате $Дq_1$ при выполнении условия $k_{D5} n_1 n_2 \omega_0^2 > k_{D4} n_2 (k_{D5} n_1 + \omega_1^2 n_3)$. В противном случае более эффективным случаем оказывается управление по координате Δq_1.

Произведем сравнение эффективности введения дополнительной обратной связи, формируемой на привод и на промежуточную массу m_1, используя функционалы (11) и (24):

$$k_{52} = \frac{J_5}{J_2} = \frac{(F + k_{D5} n_1)}{(\omega_1^2 n_3 + k_{D5} n_1)} \cdot \frac{n_1^2 k_{D2}^2 - n_1 k_{D2}[\omega_1^2 (n_1 - 1) + \omega_0^2 n_2] - \omega_0^2 \omega_1^2 n_2 n_3}{-n_1 k_{D2}[\omega_1^2 (n_1 - 1) - \omega_0^2 n_2] - \omega_0^2 n_2 F}. \quad (29)$$

Из соотношения (29) следует, что дополнительная обратная связь, которая охватывает механическую передачу, эффективнее ($k_{52} < 1$) связи, охватывающей весь исполнительный механизм, при выполнении условия

$$k_{D5}(k_{D2} n_1 - \omega_0^2 n_2)^2 > -k_{D2}^2 n_1 F + \omega_0^2 n_2 (F - \omega_1^2 n_2).$$

Исследования показали, что эффективность данной связи определяется не только коэффициентом усиления k_{D5}, но и соотношением между инерционностью звеньев, а также собственных частот системы. Обратная связь, которая формируется на промежуточную массу, более эффективна при наименьшей инерционности привода n_1 и большей инерционности промежуточного звена n_2; эта связь тем эффективнее, чем больше собственная частота колебаний промежуточной массы ω_0.

Квадратичный функционал и условие эффективности при управлении колебаниями по координате $Дq$ определяется следующими выражениями:

$$J_6 = \frac{Q_0^2 n_1 F}{2\mu\omega_0^2 n_2 (\omega_1^2 n_3 \pm k_{D6} n_1)}; \quad (30)$$

$$k_{60} = \frac{J_6}{J_0} = \frac{\omega_1^2 n_3}{(\omega_1^2 n_3 \pm k_{D6} n_1)}. \quad (31)$$

Анализ условия эффективности на основании выражения (31) показывает, что пропорциональная дополнительная связь может быть эффективна только при положительном коэффициенте усиления k_D. Согласно соотношению (31), эффективность обратной связи зависит от соотношений между инерционностью исполнительного механизма n_3 и привода системы n_1; данная связь наиболее эффективна при большем n_3 и меньшем n_1. Также эффективность положительной пропорциональной дополнительной связи зависит от частоты собственных колебаний ω_1; она будет тем эффективнее, чем меньше эта частота. С изменением этих величин будет изменяться и эффективность дополнительной связи. Исследования показывают, что система с дополнительной обратной связью этого типа будет устойчива при условии $k_{D6} < \omega_0^2 \frac{n_2}{n_1}$.

Сравним эффективность данного типа управления с эффективностью рассмотренных выше управлений для положительного коэффициента усиления пропорциональной обратной связи: по координате Δq_1

$$k_{64} = \frac{J_6}{J_4} = \frac{F\omega_1^2 n_3}{(\omega_1^2 n_3 + k_{D6} n_1)(F - k_{D4} n_2)} \quad (32)$$

и координате Δq_2

$$k_{65} = \frac{J_6}{J_5} = \frac{F(k_{D5} n_1 + \omega_1^2 n_3)}{(\omega_1^2 n_3 + k_{D6} n_1)(F + k_{D4} n_1)}. \quad (33)$$

Анализ выражений (32) и (33) показывает, что указанное управление может быть эффективнее управления по координатам Δq_1 и Δq_2 при выполнении условий

$$k_{D4} n_2 (k_{D4} n_1 + \omega_1^2 n_3) < k_{D6} n_1 F$$

и

$$k_{D5}(\omega_0^2 n_2 - k_{D6} n_1) < k_{D6} F$$

соответственно.

Проанализируем условия эффективности дополнительных обратных связей, формируемых на первую и вторую массы, используя соотношение:

$$k_{63} = \frac{J_6}{J_3} = \frac{F' c c_1 + c_1 k_D (\pm F' \mp c^2 m_1 - k_D c m_1)}{2(c + c_1) \cdot [-c m_1 k_D^2 \pm k_D (F' - c c_1 m_1) + c c_1^2 m]}. \quad (34)$$

Анализ соотношения (34) показывает, что если соблюдается условие

$$k_{D6}\omega_0^2 n_2 (k_{D3}\omega_1^2 n_1 - \omega_0^2 F) >$$
$$> k_{D3}[k_{D3}\omega_1^2 n_1 F - \omega_0^2 (F^2 - n_2^2 \omega_0^2 \omega_1^2)],$$

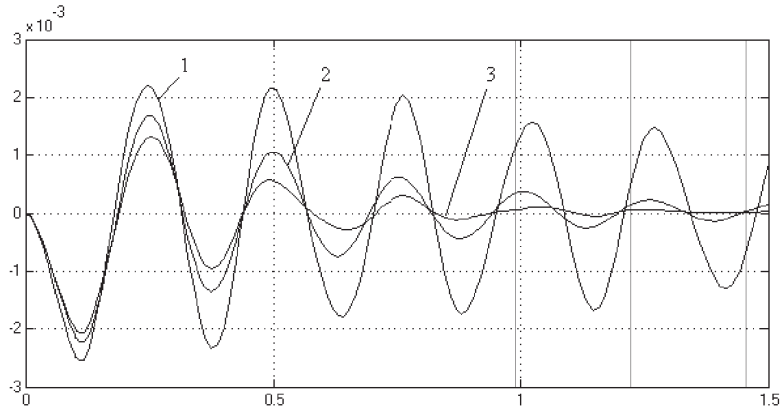
то эффективна пропорциональная дополнительная обратная связь, охватывающая механическую передачу. Как следует из выражения (34), эффективность этой связи определяется не только коэффициентом усиления k_{D6}, но и зависит от параметров системы. Обратная связь, которая охватывает механическую передачу, более эффективна при меньшей инерционности привода n_1 и большей инерционности последней массы n_3 $(n_3 > n_2 > n_1)$; эта связь тем эффективнее, чем больше собственная частота колебаний второй массы ω_0. В противном случае эффективность дополнительной связи снижается.

Все изложенное позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, при управлении колебаниями трехмассовой системы необходимо учитывать, что эффективность гашения колебаний пропорциональной обратной связью зависит от соотношений между инерционностью привода, инерционностью промежуточной массы и инерционностью исполнительного органа, а также от собственных частот колебаний звеньев. Во-вторых, при введении в колебательную систему положительной пропорциональной связи возможно формирование управления, как по координате $\Delta q_1, \Delta q_2$, так и координате Δq. Причем, каждый из вариантов управления, может оказаться более эффективным при соответствующей настройке коэффициентов усиления дополнительных связей. В-третьих, в зависимости от конфигурации исполнительных механизмов и значений коэффициентов усилений компенсирующее воздействие может быть организовано и на первую массу, и на вторую колебательной трехмассовой системы.

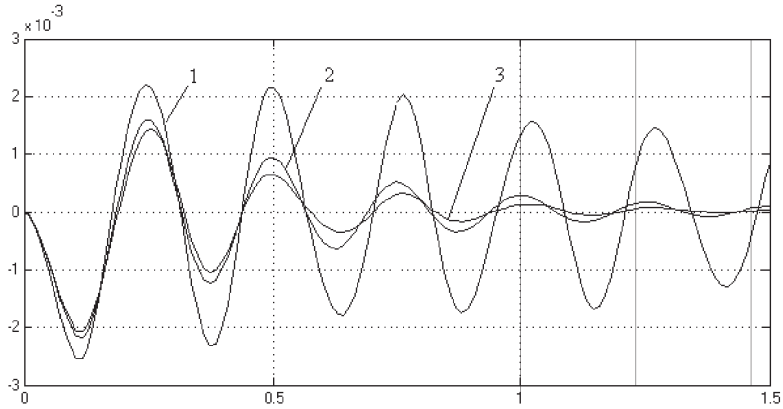
В связи с затруднениями в вычислительном плане при исследовании вариантов управления для дифференцирующей обратной связи на основе структурной схемы было проведено численное моделирование процессов управления движением трехмассовой колебательной системы. Исследования выполнялись с использованием системы визуального моделирования Simulink с помощью блок-диаграммы, построенной на основе структурной схемы, изображенной на рис. 2. Моделирование проводилось при следующих значениях параметров системы: $m_n = 10$ кг; $m_1 = 20$ кг; $m = 45$ кг; $c_1 = 0{,}8 \cdot 10^4$ Н/м; $c = 1{,}5 \cdot 10^4$ Н/м; $b = 15$ НМс/м. На вход модели подавалось воздействие в виде ступенчатого сигнала $Q_n = Q_0 1(t)$. На выходе модели формировался сигнал, соответствующий суммарным упругим колебаниям робота $\Delta q = \Delta q_1 + \Delta q_2$. Результаты моделирования приведены на рис. 3а-б.

На рис. 3,а показаны графики упругих колебаний трехмассовой системы для управления колебаниями по координатам $\Delta q_1, \Delta q_2$ и Δq: кривая 1 соответствует колебаниям системы без дополнительной связи; 2 — при управлении упругими колебаниями по координате Δq_1; 3 — при управлении колебаниями системы по координате Δq. В результате исследований было установлено, что ни положительная, ни отрицательная дифференцирующая обратная связь при управлении по координате упругого отклонения исполнительного механизма Δq_2 не эффективна. На рис. 3,б приведены графики колебаний трехмассовой системы для различных вариантов формирования управляющего воздействия: 1 - колебания системы без дополнительной связи; 2 — при введении отрицательной дифференцирующей обратной связи на промежуточное звено; 3 — при введении положительной дифференцирующей обратной связи на привод системы.

Анализ приведенных кривых показывает, что введение дополнительных связей позволяет снизить амплитуду колебаний трехмассовой системы и сократить время переходного процесса. Для данных параметров системы наиболее эффективными дополнительными обратными связями являются связи, формируемые на первую массу и охватывающие привод и механическую передачу. В тоже время для гашения колебаний трехмассовой системы наиболее эффективно оказалось введение в систему дополнительных связей по суммарным упругим колебаниям робота Δq. Также, в ходе численного моделирования было установлено, что при массе привода большей, чем массы звеньев наиболее эффективным становится формирование компенсирующего воздействия на промежуточную массу по координате упругого отклонения передаточного механизма Δq_1. Дифференцирующая обратная



а)



б)

Рис. 3. Графики упругих колебаний трехмассовой системы.

связь по координате Δq в этом случае становится неэффективна.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Елисеев, С. В. Управление колебаниями роботов / С. В. Елисеев, Н. К. Кузнецов, А. В. Лукьянов. — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. — 320 с.
2. Кузнецов, Н. К. Управление движением трехмассовой колебательной системой / Н. К. Кузнецов, А. Ю. Перелыгина // Проблемы механики современных машин : Материалы третьей международной конференции / ВСГТУ. — Улан-Удэ, 2006. — Т. 1. — С. 188-191.
3. Кузнецов, Н. К. Управление колебаниями трехмассовой системы / Н. К. Кузнецов, А. Ю. Перелыгина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование : научн. ж-л / Иркут. гос. ун-т путей сообщ. — 2007. — № 1. — С. 14-18.
4. Топчеев, Ю. И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. / Ю. И. Топчеев. — М. : Машиностроение, 1989. — 752 с.

Dmitriy Yu.Kobzov, Lhanag Dorligsuren, Deleg Dorjbal

DIALECTICAL APPROACH TO THE INSIGHT INTO ENGINEERING OBJECTS EVOLUTION

Engineering object functioning is inevitably accompanied by negative changes in their structural parameters, following them are functional, technico-economic ones and those of accompanying processes which are interrelated among them in a definite way (Fig.1).

It is desirable to represent the whole range of these continuous microevents by the model of structure and cause and effect relationship of the object — MSCER (Fig.2). It is the most suitable logical description of simple objects such as hydraulic drive hydrounits of road & building construction machinery. These models are worked out on the basis of the analysis of structural scheme of the object under investigation and conditions of its work having regard to the conformities with laws of structural parameters degradation. So the MSCER in Fig.2 contains 13 levels: 1 — an engineering object (EO); 2 — constructive elements groups of EO; 3 — EO constructive elements proper; 4 — structural parameters of object elements; 5 — EO elements characteristic defects and damages; 6 — boundaries of the greatest evolution of EO technical state at a maximum qualitative or quantitative change of a particular structural parameter; 7 — defect or damage signs (symptoms); 8 — diagnostic parameters; 9 — their controllable components; 10 — the matrix of interconnection (Fig.3); 11 — EO characteristic qualitative peculiarities, degradation of which as it is operated is connected with evolution of the technical state; 12 — specific weights of object failures caused by its concrete constructive elements defects; 13 — and finally prices of each of them [1,2].

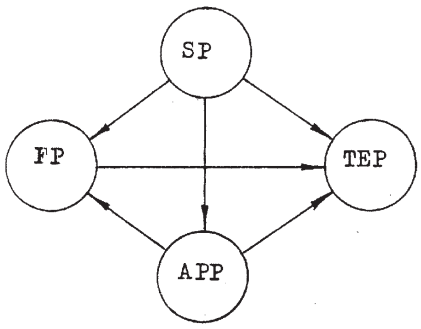
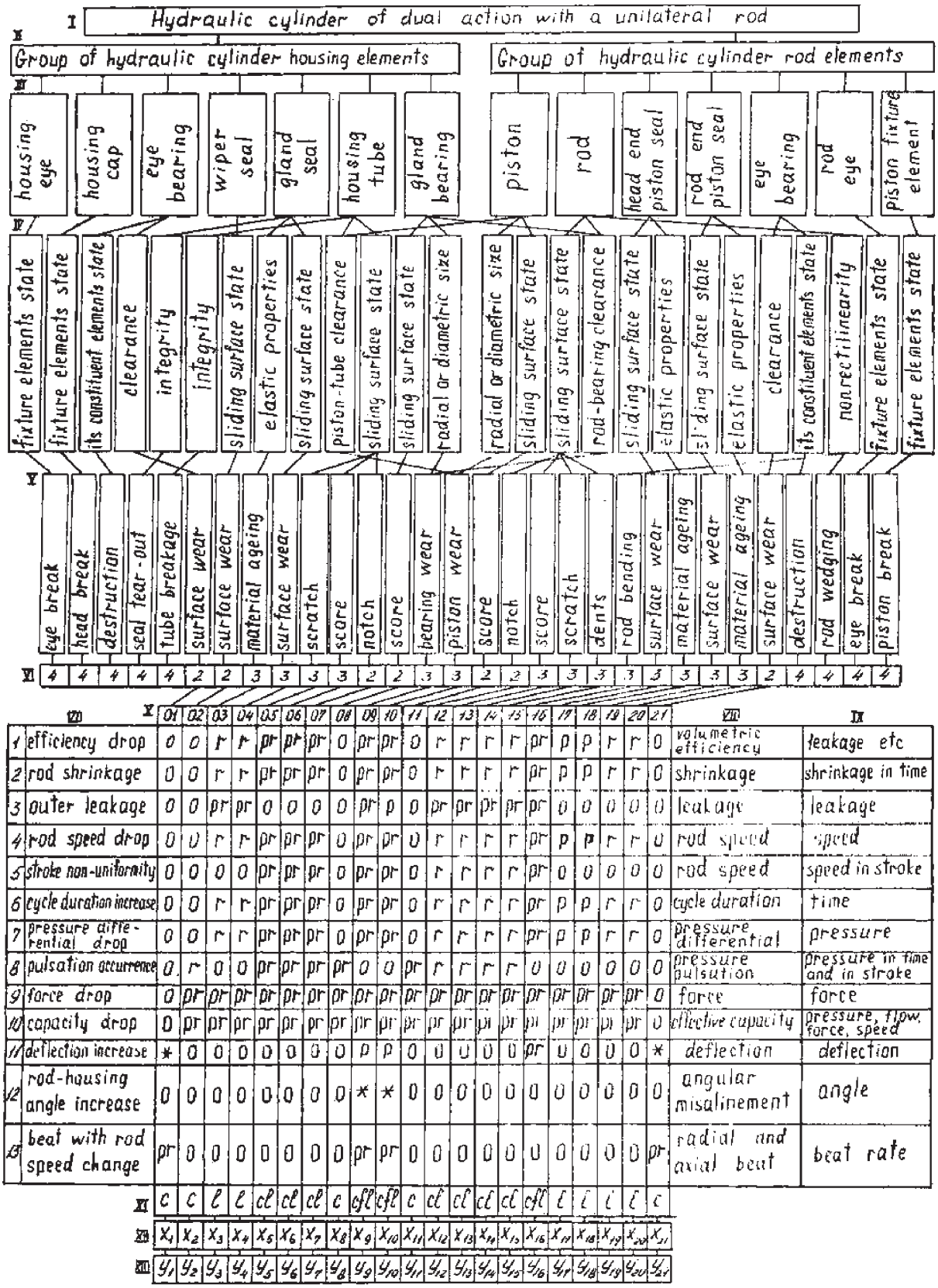


Fig.1. The scheme of technical object parameters change in the process of its operation; SP – structural parameters; FP – functional parameters; TEP – technico-economic parameters: APP – accompanying processes parameters; → - cause and effect relationship.

It is when and due to irreversible changes of all the mentioned parameters that degradation of engineering object state which is accompanied by discrete macroevents of technical state types and variations change take place. As it is known [3] variations of object structural parameters values come about within it under the influence of external factors and due to interaction of elements when the object is operated. These values change from predetermined ones to the limiting ones, the result of which is a similar change of values of its technical and economic functional parameters etc. And this change is invariably accompanied by the transition of an object from one complex of technical state into another one, that is from one variety of technical state into another one as is show in Fig.4. It goes without saying that evolution of object technical state types occurs within the limits of operative (+0), and inoperative (-0), fit for work (F+) to unfit (-F), from the state of regular functioning (+RF) to that of irregular one (-RF). There is no doubt that: an operative object is always fit for work while the object fit for work may be both operative and inoperative; an inoperative object may be both fit for work and unfit for work or failed; the failed object is always inoperative; the inoperative object but fit for work may be characterized by both regular functioning and irregular one; the operative fit for work object is always characterized only by regular functioning. From this it follows that the evolution of any object technical state as it is operated occurs from complex 1 of technical state types which is characterized by working order, fitness for work and regular functioning (+0+F+RF) through



	VII \ X	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	VIII	IX
1	efficiency drop	0	0	r	r	pr	pr	pr	0	pr	pr	0	r	r	r	r	pr	p	p	r	r	0	volumetric efficiency	leakage etc
2	rod shrinkage	0	0	r	r	pr	pr	pr	0	pr	pr	0	r	r	r	r	pr	p	p	r	r	0	shrinkage	shrinkage in time
3	outer leakage	0	0	pr	pr	0	0	0	0	pr	p	0	pr	pr	pr	pr	pr	0	0	0	0	0	leakage	leakage
4	rod speed drop	0	0	r	r	pr	pr	pr	0	pr	pr	0	r	r	r	r	pr	p	p	r	r	0	rod speed	speed
5	stroke non-uniformity	0	0	0	0	pr	pr	pr	0	pr	pr	0	r	r	r	r	pr	0	0	0	0	0	rod speed	speed in stroke
6	cycle duration increase	0	0	r	r	pr	pr	pr	0	pr	pr	0	r	r	r	r	pr	p	p	r	r	0	cycle duration	time
7	pressure differential drop	0	0	r	r	pr	pr	pr	0	pr	pr	0	r	r	r	r	pr	p	p	r	r	0	pressure differential	pressure
8	pulsation occurrence	0	r	0	0	pr	pr	pr	pr	0	0	pr	r	r	r	r	0	0	0	0	0	0	pressure pulsation	pressure in time and in stroke
9	force drop	0	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	0	force	force
10	capacity drop	0	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	pr	0	effective capacity	pressure, flow, force, speed
11	deflection increase	*	0	0	0	0	0	0	0	p	p	0	0	0	0	0	pr	0	0	0	0	*	deflection	deflection
12	rod-housing angle increase	0	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	angular misalinement	angle
13	beat with rod speed change	pr	0	0	0	0	0	0	0	pr	pr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	pr	radial and axial beat	beat rate
XI		c	c	l	l	cl	cl	cl	c	cfl	cfl	c	cl	cl	cl	cl	cfl	l	l	l	l	c		
XII		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}		
XIII		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}	Y_{17}	Y_{18}	Y_{19}	Y_{20}	Y_{21}		

Fig.2. MSCER (with the hydrocylinder as an example).

Elements Characteristic Defects and Damages

Diagnostic signs: sign	pumping	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	p	0	0	0	0	+F	+F	+F	0	+(CD)	+B(CD)	0	0	0	0	0	+E	+AF	+A	0	0	0
	r	0	0	+A	+AF	+F	+F	+F	0	$+B^1+C$	$+B^2C$	0	+F	+F	+F	+F	+E	0	0	+AF	+A	0
2	p	0	0	0	0	+F	+F	+F	0	+(CD)	+B(CD)	0	0	0	0	0	+E	+AF	+A	0	0	0
	r	0	0	+A	+AF	+F	+F	+F	0	$+B^1C$	$+B^2C$	0	+F	+F	+F	+F	+E	0	0	+AF	+A	0
3	p	0	0	+A	+AF	0	0	0	0	$+B^1CD^1$	$+CD^1$	0	+F	+F	+F	+F	+E	0	0	0	0	0
	r	0	0	+A	+AF	0	0	0	0	$+B^1C$	+C	0	+F	+F	+F	+F	+E	0	0	0	0	0
4	p	0	0	0	0	+F	+F	+F	0	+(CD)	+B(CD)	0	0	0	0	0	+E	+AF	+A	0	0	0
	r	0	0	+A	+AF	+F	+F	+F	0	$+B^1C$	$+B^2C$	0	+F	+F	+F	+F	+E	0	0	+AF	+A	0
5	p	0	0	0	0	+F	+F	+F	0	+(CD)	+(CD)	0	0	0	0	0	+E	0	0	0	0	0
	r	0	0	0	0	+F	+F	+F	0	+C	+C	0	+F	+F	+F	+F	+E	0	0	0	0	0
6	p	0	0	0	0	+F	+F	+F	0	+(CD)	+B(CD)	0	0	0	0	0	+E	+AF	+A	0	0	0
	r	0	0	+A	+AF	+F	+F	+F	0	$+B^1C$	$+B^2C$	0	+F	+F	+F	+F	+E	0	0	+AF	+A	0
7	p	0	0	0	0	+F	+F	+F	0	+(CD)	+B(CD)	0	0	0	0	0	+E	+AF	+A	0	0	0
	r	0	0	+A	+AF	+F	+F	+F	0	$+B^1C$	$+B^2C$	0	+F	+F	+F	+F	+E	0	0	+AF	+A	0
8	p	0	0	0	0	+FJ	+FJ	+FJ	+J	0	0	+J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	r	0	+K	0	0	+FJ	+FJ	+FJ	+J	0	0	+J	+FJ	+FJ	+FJ	+FJ	0	0	0	0	0	0
9	p	0	+K-L	-L	-L	+FJ-M	+FJ-M	+FJ-M	+J	+(CD)+J	+B(CD)J-M	+J	+J	+J	+J	+J	+EJ-M	+AF-LM	+A-LM	-L	-L	0
	r	0	+K-L	+A-LM	+AF-LM	+FJ-M	+FJ-M	+FJ-M	+J	$+B^1C$-M	$+B^2C$-M	+J	+FJ-M	+FJ-M	+FJ-M	+FJ-M	+E	-L	L	+AF-LM	+A-LM	0
10	p	0	+K-L	-L	-L	+FJ-M	+FJ-M	+FJ-M	+J	+(CD)+J	+B(CD)J-M	+J	+J	+J	+J	+J	+EJ-M	+AF-LM	+A-LM	-L	-L	0
	r	0	+K-L	+A-LM	+AF-LM	+FJ-M	+FJ-M	+FJ-M	+J	$+B^1C$-M	$+B^2C$-M	+J	+FJ-M	+FJ-M	+FJ-M	+FJ-M	+EJ-M	-L	-L	+AF-LM	+A-LM	0
11	p	+G	0	0	0	0	0	0	0	+G	+G	0	0	0	0	0	+H	0	0	0	0	+G
	r	+G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+H	0	0	0	0	+G
12	p	0	0	0	0	0	0	0	0	+G	+G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	r	0	0	0	0	0	0	0	0	+G	+G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	p	+G	0	0	0	0	0	0	0	+G	+G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+G
	r	+G	0	0	0	0	0	0	0	+G	+G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+G

Diagnostic parameters

Fig.3. Interrelation MSCER hydrocylinder matrix presentation.

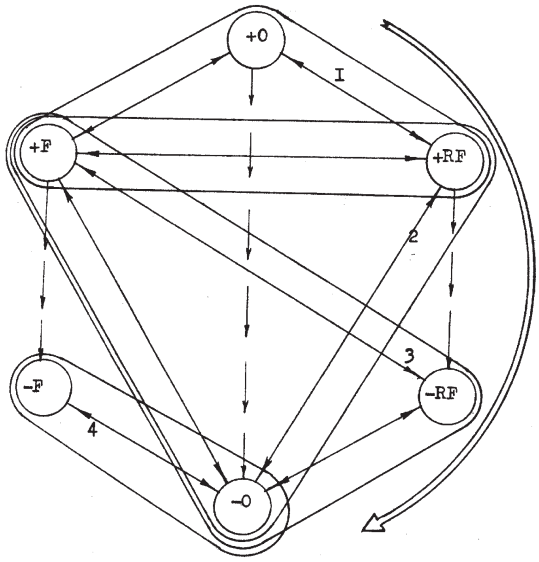


Fig.4. The scheme of EO technical state type evolution as it is operated and their interaction with a particular technical state variation: →→ - the direction of type evolution; — - the boundary of a particular object technical state variation; ↔ - the interaction of types within a variation; ⇒ – the direction of state variation evolution.

variabilities 2 (-0+F+RF) and 3 (-0+F-RF) to complex 4 of state types which is characterized by unfitness for work (-0-F). In a special case not every stage of technical development is necessary and the appearance of the latter is not desirable. The intensity of evolution stage change having prevailing significance for working out the algorithm and prognostic governing rules increases with its operation as the object elements accumulate defects, that is because of continuing qualitative and quantitative change of its structural parameters and is mainly determined by constant deteriorating interaction conditions of elements within the object and the increase of external factors influence on it.

The above-named complex of events is recommended to represent in the form of the graph of cause and effect relationship of evolution of structural, technological, functional parameters as well as those of accompanying processes and loading operation conditions as a result of engineering object maintenance (Fig.5). It is desirable to develop such a graph on the basis of experimental investigation results synthesis, theoretical research, gained experience and intuition, but with obligatory analytical description of all the revealed cause and effect relationship at the final stage.

The structure of such a graph includes several typical levels.

First level (I) — the level reflecting object development evolution: H_{hc} — hydrocylinder power: I_{hc} — its work intensity.

Second level (II) — the level of its main structural varied and planned parameters: Z — *rod stroke;* D_1, D_2 — piston and rod diameters; P — working fluid pressure.

Third level (III) — the level of structural and technological features: B_{23}^0 — technological deviations from rod and casing rectilinearity; C_{13}^0, C_{24}^0 — clearance in sealing conjugations; D_0 — hydraulic cylinder support bearing diameter; Q_{hc} — hydraulic cylinder weight; P_{hc} — rod force; G_{hc} — hydrocylinder length; V_0 — support bearing rotation.

Fourth level (IV) — the level of functional parameters: Q^D_{hc} — dynamic loads; e_S^0 — static eccentricity of support load application; e_K^0 — kinematic eccentricity of support load application; y_α — hydrocylinder deflection because of clearance in its sealed conjugation; y_β - hydrocylinder deflection because of technological deviation rod and casing rectilinearity; y_γ - the same as in previous but as a result of working distortion; y_δ - hydrocylinder deflection because of diametric deformation under casing pressure; y_D - hydrocylinder deflection under the influence of dynamic load; y_P - hydrocylinder deflection from longitudinal loading; y_Q - hydrocylinder deflection from transverse loading; y_R — hydrocylinder deflection from support friction; y_Σ^0 — total hydrocylinder deflection.

Fifth level (V) — the level of loading parameters: M_k — bending moment from support friction; M_{pe}^{KS} — bending moment from support loads eccentric application; M_Q^{SD} - bending moment from transverse static and dynamic loads; M_{py} — bending moment from deformed hydrocylinder longitudinal loading; R_0 — hydrocylinder support reactions; $R_{13,}$ R_{24} — reactions in hydrocylinder sealed conjugation; S_i^o - operative tensions.

Sixth level (VI) — the level of typical parameters and those of accompanying processes; * — above mentioned characteristics

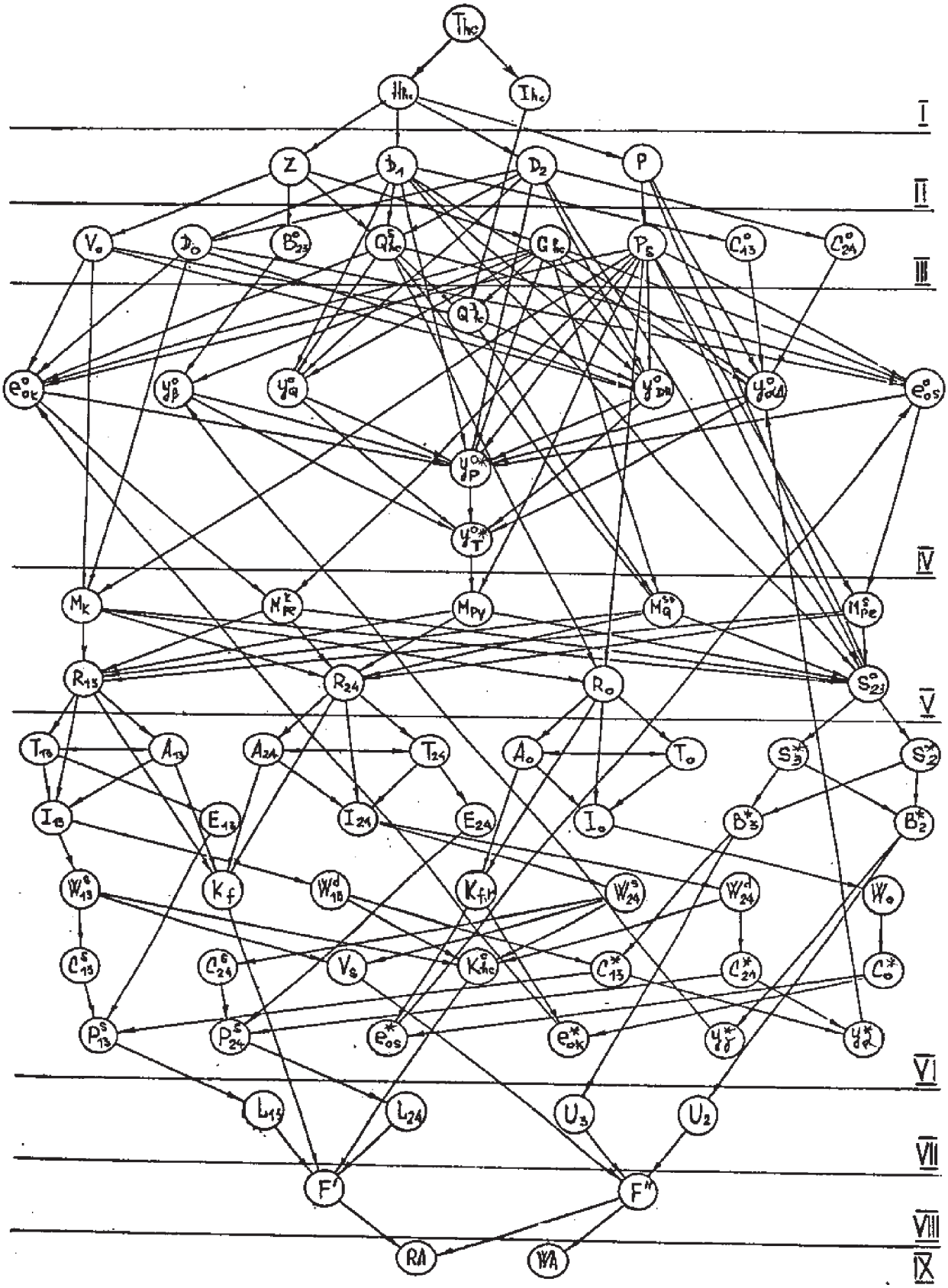


Fig.5. The graph of cause and effect relationship of evolution object parameters and loading operation conditions as a result of engineering object maintenance.

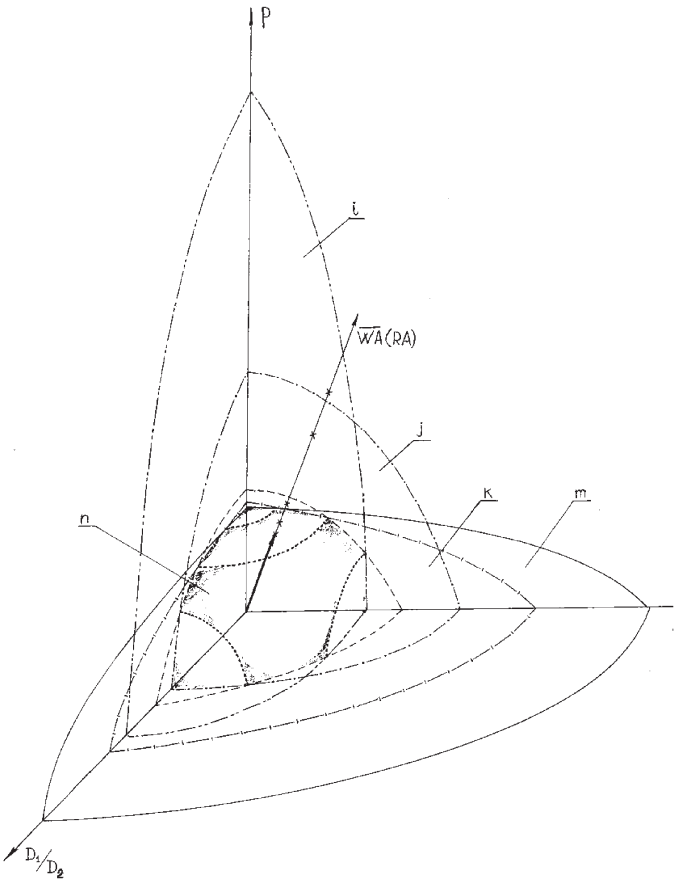


Fig.6. The N-dimensional space of possible modification of engineering object basic structural parameters for a particular working process, operation and maintenance conditions.

increment; A_0, A_{13}, A_{24} — complex characteristics of seizing and setting of hydrocylinder conjugation elements; C_0 — support bearing clearance; C_{13}, C_{24} — clearances between packer and sealed surface; E_{13}, E_{24} — complex characteristics of packer material resilient properties relaxation; I_0, I_{13}, I_{24} — hydrcylinder element wear intensity; K_0 — support bearing coefficient of friction; K_{hc}^{f} — hydrocylinder mechanical coefficient; K_{hc}^{c} — working fluid contamination degree; P_{13}^{S}, P_{24}^{S} - packer contact pressure; S'_i, S''_i — fatigue stress and yield stress limits; V_S - packer integrity; W_Q - support bearing wear; W_{13}^{SD}, W_{24}^{SD} — packer wear; T_0, T_{13}, T_{24} — temperature.

Seventh level (VII) — the level of object typical properties: L_{13}, L_{24} — sealed conjugations pressurizing capacity (leakage); U_2, U_3- hydrocylinder supporting power (banding strain).

Eighth level (VIII) — the level of failure types: F' — parametric failure; F'' — complete failure.

Ninth level (IX) — the level of object estimated features: *RA* — reliability; *WA* — workability.

All the typical graph points are connected by cause and effect relationships.

Getting in this way a full logical system of events it is necessary to reveal engineering object state criteria (*i, j, ... n,* etc.) which ultimate quantitative changes inevitably cause its state specified variety occurrence for the accepted level of reliability *RA* (Fig.6). We should aim on the one hand at minimizing their number and degree of mutual overlapping and on the other — at simultaneous increase of significance of every one of them and provision and embracing all the events by criteria complex.

Then it is necessary to relate them with scanning vector WA (Fig.6) in N-dimensional space of possible modification of engineering object basic structural parameters for a particular working process, operation and maintenance conditions. Established in the final analysis set of technical state criteria limiting values is the measure of the given

quantitative-qualitative object definiteness within its scope it is workability with a specified reliability level and it can be changed in the direction of some general development trend according to principles primordial peculiar to it.

REFERENCES

1. Kobzov D.Y., Martynenko O.P., Gubanov V.G. There must be no alternative to the right choice of diagnostic parameters. Proceedings of the 2nd International Machinery Monitoring & Diagnostics Conference & Exhibit, Los Angeles, California, 1990. PP.374-380.
2. Kobzov D.Y. Diagnostics of Hydrocylinders of Single Bucket Excavators Working Equipment. Synopsis of thesis for doctor's degree. Leningrad, 1987. 22 p.
3. Reliability and Effectiveness in Engineering. Reference book. In 10 vol. (Ed.B.: Avduevskiy V.C. et al.). Moscow, Machine-building, 1986. V.I: Methodology. Organization. Terminology. Edited by Rembeza A. 224 p.

Носков С.И.

УДК 330.115

ТОЧЕЧНАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МНОЖЕСТВА ПАРЕТО В ЛИНЕЙНОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ

К числу классических в теории принятия решений относится многокритериальная задача линейного программирования (МЛП), формальная постановка которой имеет вид:

$$Cx \to \max_{x \in X}, \qquad (1)$$

$$X = \left\{ x \in R^n \middle| Ax \le b, x \ge 0 \right\}. \qquad (2)$$

Здесь, в отличие от обычной задачи линейного программирования (ЛП), С — матрица размерности $l \times n$, а не вектор; А — матрица ограничений размерности $m \times n$. Таким образом, многокритериальная задача (1), (2) предполагает максимизацию на многограннике X не одного линейного критерия, как в обычной задаче (ЛП), а l критериев одновременно.

Заметим, что от нормальной формы задачи (1), (2) легко перейти к канонической. Ограничение $x \ge 0$, также легко обходится.

Как правило, традиционного решения задачи (1), (2) не существует, то есть отсутствует точка $x \in X$ такая, что $Cx > Cy$ для всех $y \in X, y \ne x$. В случае, когда у лица, принимающего решения (ЛПР), отсутствует какая-либо априорная информация относительно сравнительной важности критериев, под решением задачи (1), (2) принято понимать так называемое множество Парето. Обозначим его через $N \subset X$. Решение $x \in N$ называется паретовским (недоминируемым, неулучшаемым), если его нельзя улучшить по какому-то одному критерию, не ухудшив значение хотя бы одного из оставшихся. Или, формально,

$$x \in N \Leftrightarrow (\forall y \in X, y \ne x) \neg((Cy \ge Cx) \wedge (\exists i\, C^i y > Cx)),$$

где C^i - i-ая строка (i-ый критерий) матрицы C.

Проблеме построения множества Парето в задаче МЛП посвящена обширная литература. Вместе с тем, одной из лучших (если не лучшей) публикацией на эту тему является, по-видимому, статья американских математиков P. L. Yu и M. Zeleny [1]. Именно здесь приведены хорошо теоретически обоснованные методы построения множества паретовских вершин $N^{ex} \in N$и всего множества Парето.

Для построения множества N^{ex} в [1] представлен так называемый многокритериальный симплекс-метод. Он основан на двух основных теоремах, формулировки которых мы приведем здесь без доказательства.

Теорема 1 ([1]).
Множество N^{ex} связно.

Теорема 2 ([1]).
$x^0 \in N \Leftrightarrow \omega = 0. \quad x^0 \in D \Leftrightarrow \omega > 0.$

Здесь $D = X \diagup N$, а ω - решение задачи ЛП

$$\omega = \max \sum_{i=1}^{l} e_i, \qquad (3)$$

$$\tilde{X} = \left\{ (x,l) \in R^{n+l} \middle| x \in X, Cx - e \geq Cx^0, e \geq 0 \right\}. \qquad (4)$$

Суть алгоритма построения множества N^{ex}, описанного в [1], состоит в следующем. Сначала ищется первая паретовская вершина x^1. Для этого достаточно решить задачу ЛП с целевой функцией

$$\sum_{i=1}^{l} \lambda_i C^i x \to \max_{x \in X}, \ \lambda > 0.$$

После этого на паретовость путем решения задачи (3), (4) проверяются все соседние к x^1 точки. Те из них, которые окажутся паретовскими, включаются в N^{ex}, проверке подвергаются соседние к ним и т. д.

Следует отметить, что в [1] приведен (см., например, теорему 3.1 в [1]) ряд простых достаточных условий принадлежности некоторой произвольной точки $y \in X$ множеству D, что существенно облегчает перебор.

Наряду с многокритериальным симплекс-методом в [1] показано, что для любой точки $x \in N^{ex}$ существует набор чисел $\lambda_i \in (0,1)$, $i = \overline{1,l}$ такой, что

$$x = \arg \max_{y \in X} \sum_{i=1}^{l} \lambda_i C^i y. \qquad (5)$$

Это означает, что множество N^{ex} можно построить, перебирая узлы l — мерной Σ-сети на множестве

$$\Lambda = \left\{ \lambda \in R^l \middle| \lambda_i \in (0,1), i = \overline{1,l} \right\}$$

и решая для каждого узла задачу ЛП (5).

Далее в [1] показывается, как на основе N^{ex} можно построить множество N. При этом N будет представлять собой объединение паретовских выпуклых комбинаций (граней многогранника X) точек из N^{ex}.

Заметим, что со всем множеством Парето N работать трудно, поскольку оно содержит бесконечное число возможных «равноправных» решений, ЛПР же, как правило, для реализации требуется какое-то одно решение. В то же время вся объективная информация уже использована, как будто бы, при построении множеств N^{ex} и N.

Казалось бы, выходом из этой ситуации может быть решение задачи ЛП (5) с равными весовыми коэффициентами:

$$\lambda_i = \frac{1}{l}.$$

Это, однако, не так по двум причинам. Во-первых, такой способ предполагает одинаковую важность для ЛПР всех l критериев, что сужает постановку исходной задачи. И, во-вторых, такое решение непременно «выведет» на какую-нибудь точку из N^{ex} (то есть на вершину), игнорируя, по существу, множество N/N^{ex}.

Способ, позволяющий ЛПР выделить для реализации лишь одну точку из N и не требующих дополнительных соображений субъективного характера, может состоять в следующем.

Прежде всего заметим, что каждое паретовское решение $x \in N$ равноправно по отношению к другим паретовским решениям (не лучше, но и не хуже них). Следовательно, при выделении единственной точки из N (то есть при точечной характеризации N) для реализации должно быть учтено (пусть и неявно) все множество N.

Отметим далее, что такая характеризация — обозначим ее через $\tilde{x}$ - должна отражать конфигурацию множества N, в значительной мере задаваемую множеством N^{ex}.

Основанная на учете этих двух соображений идея поиска решения $\tilde{x} \in N$ состоит в следующем. Необходимо, считая каждую точку из N^{ex} равноправной по отношению к другим, найти выпуклую комбинацию всех точек из N^{ex} с равными весами. Обозначим её через $x^\star$:

$$x^\star = \frac{1}{p} \sum_{x \in N^{ex}} x, \qquad (6)$$

где p - число элементов (мощность) множества N^{ex}.

Ясно, что в общем случае точка $x^\star$ не является паретовской. Поэтому естественно в множестве N выделить точку (ранее обозначенную через $\tilde{x}$), в максимальной степени «улучшающую» $x^\star$ по всем критериям.

Воспользуемся для этого теоремой 2 и решим задачу (3) на множестве

$$X^\star = \left\{ (x,l) \in R^{n+l} \middle| Cx - e \geq Cx^\star, e \geq 0 \right\}. \qquad (7)$$

Полученное решение и будет искомой характеризацией $\tilde{x}$ множества N.

Пример.

С целью сохранения последовательности изложения возьмем пример из [1]:

$$A=\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & 2 & -1 & 1 & -2 & -1 \end{pmatrix},$$

$$b=\begin{pmatrix} 16 \\ 16 \\ 16 \\ 16 \end{pmatrix},$$

$$C=\begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 3 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}.$$

При решении этой задачи с помощью многокритериального симплекс — метода множество N^{ex} составили шесть точек:

$$x^1=(0,0,0,0,8,0,0),$$
$$x^2=(0,0,0,16,0,0,0),$$
$$x^1=(16,0,0,0,0,0,0),$$
$$x^4=(8,0,8,0,0,0,0),$$
$$x^5=\left(0,0,\frac{32}{3},\frac{16}{3},0,0,0\right),$$
$$x^6=\left(0,0,\frac{16}{3},0,\frac{16}{3},0,0\right).$$

Образом множества N^{ex} в критериальном пространстве являются точки

$$Cx^1=(16,24,0)',$$
$$Cx^2=(48,32,-16)',$$
$$Cx^3=(16,0,16)',$$
$$Cx^4=(0,8,16)',$$
$$Cx^5=\left(\frac{16}{3},\frac{64}{3},\frac{16}{3}\right)',$$
$$Cx^6=\left(\frac{16}{3},\frac{64}{3},\frac{16}{3}\right)'.$$

По формуле (6) найдем выпуклую комбинацию точек из N^{ex} с равными весами:

$$x^*=(4,0,4,3.55,2.2,0,0).$$

Далее посредством решения задачи (3) на множестве (7) найдем точечную характеризацию $\tilde{x}$ множества Парето N:

$$\tilde{x}=(4.075,0,0.375,0,5.775,0,0).$$

При этом расстояние от точки Cx^* до множества Парето в критериальном пространстве CN будет равно 0.4 ($\omega=\sum_{i=1}^{3} e_i=0.4$).

Наконец, образом окончательного решения задачи будет точка

$$C\tilde{x}=(15.25,17.7,4.45)'.$$

Заметим, что если бы мы решили задачу (5) с равными весами, решением стала бы точка x^2 ($\sum_{i=1}^{3} C^i x_i^2=64$).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Yu L., Zeleny M. The set of all nondominated solutions in linear cases and multycriteria simplex method // J. of Math. Anal. and Applic.-1975.-v.45.-N2.-P.430-468.

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Арсентьев М.О. УДК 621.311

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНО-ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ СИНХРОННЫХ КАЧАНИЯХ ГЕНЕРАТОРОВ

Введение. При возмущениях в электроэнергетических системах (ЭЭС) могут возникать периодические изменения фазовых углов генераторов, так называемые синхронные качания [1]. На рис. 1 представлена экспериментально полученная зависимость $\delta_{ij} = \delta_{ij}(t)$, где δ_{ij} - разность фаз на отправном и приемном концах ЛЭП 400 кВ [2]. График показывает, что максимальная разность фазовых углов достигает 105°.

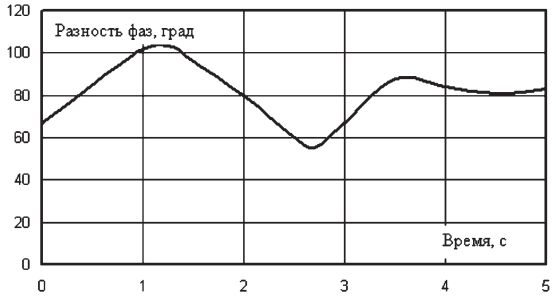


Рис. 1. Изменения разности фаз на приемном и отправном концах ЛЭП 400 кВ.

Постановка задачи и методы ее решения. Во время качаний генераторов напряжения в различных точках ЭЭС изменяются и могут снижаться до недопустимых величин. Поэтому становится актуальной задача создания методики моделирования режимов ЭЭС при синхронных качаниях. В традиционной однолинейной постановке эта задача может быть легко решена на основе известных методов [3] путем задания соответствующих фазовых углов в узлах P-U типа, отвечающих генераторам. Однако для ЭЭС с преобладающей электротяговой нагрузкой задача существенно усложняется и требует перехода к фазным координатам. В настоящей статье описывается методика расчета режимов при синхронных качаниях, основанная на математических моделях ЭЭС в фазных координатах, предложенных в работе [4]. Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса FLOW3, разработанного в ИрГУПСе [5].

Результаты моделирования. Для предварительного анализа моделирование выполнено применительно к схеме ЭЭС простой структуры, которая показана на рис. 2.

Результаты моделирования в виде зависимостей $U = U(S)$ приведены на рис. 3. Символом U обозначено фазное напряжение в заданных точках ЛЭП 110 кВ, а символом S — расстояние по трассе ЛЭП. Отсчет ведется от правой подстанции по рис. 2.

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что предлагаемая методика позволяет рассчитывать любые режимы, возникающие при синхронных качаниях, вплоть до углов в 180 є, отвечающих крайне тяжелым режимам, при которых протекают

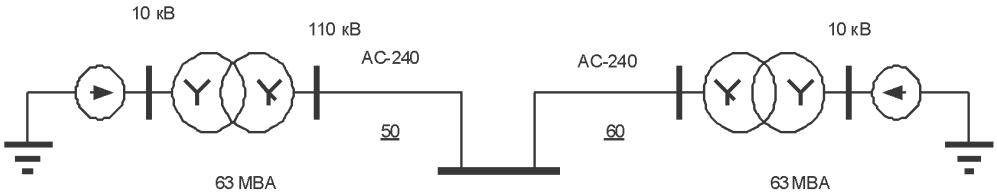


Рис. 2. Схема ЭЭС.

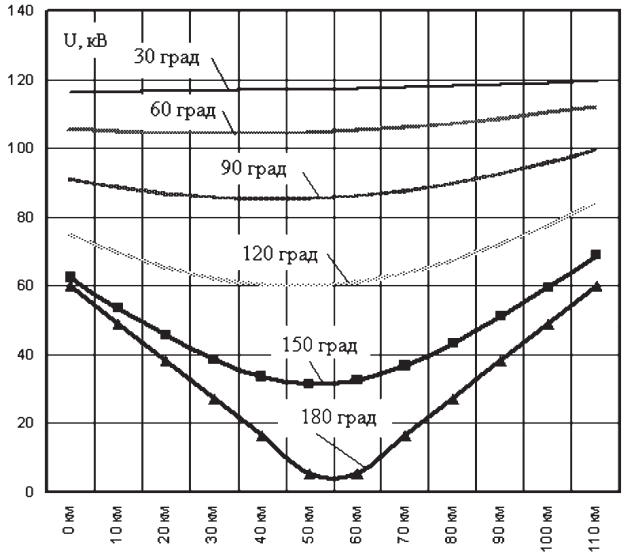


Рис. 3. Изменения напряжений по трассе ЛЭП при качаниях.

токи, в два превышающие токи трехфазного металлического короткого замыкания. Из рис. 3 видно, что при качаниях напряжение в сети существенно снижается, что особенно проявляется в так называемом электрическом центре системы [1]. Для данной схемы электрический центр расположен на расстоянии 55 км от правой питающей подстанции.

Для обоснования применимости предлагаемой методики к моделированию режимов синхронных качаний для трехфазно-однофазных сетей, питающих электротяговые нагрузки, проведены расчеты системы электроснабжения (СЭС) западного участка Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМ) при синхронных качаниях генераторов Усть-Илимской и Мамаканской ГЭС. Внешнее электроснабжение магистрали образуют две воздушные линии электропередачи 220 кВ (рис. 4), протяженность которых значительно превышает рекомендуемую для ЛЭП данного класса напряжения [6]. Расчетная схема, сформированная средствами комплекса FLOW3, показана на рис. 5. Результаты моделирования представлены в виде графиков $U = U\left(\delta_{ij}\right)$ и $k_2 = k_2\left(\delta_{ij}\right)$, приведенных на рис. 6 и 7. Здесь k_2 — коэффициент несимметрии по обратной последовательности. На рис. 8 и 9 показан характер изменения напряжений и несимметрии по трассе ЛЭП 220 кВ.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- разработанная методика применима для моделирования режимов при синхронных качаниях в трехфазно — однофазных ЭЭС, питающих электротяговые нагрузки магистральных железных дорог переменного тока;
- при синхронных качаниях наблюдается значительное снижение напряжения в узловых точках сети (до 123 кВ для СЭС БАМ) и существенный рост несимметрии (до 5% для СЭС БАМ), этот факт необходимо учитывать при планировании режимов системы электроснабжения и настройке устройств релейной защиты и автоматики;
- наибольшее снижение напряжения и соответствующее увеличение несимметрии имеет место вблизи электрического центра

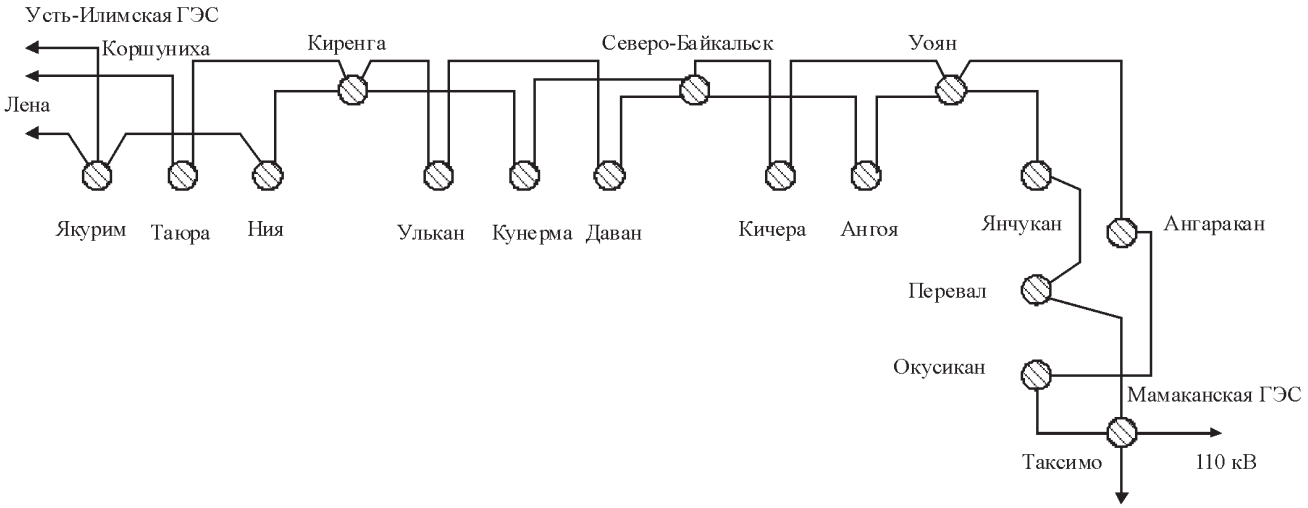


Рис.4. Схема внешнего электроснабжения западного участка БАМ.

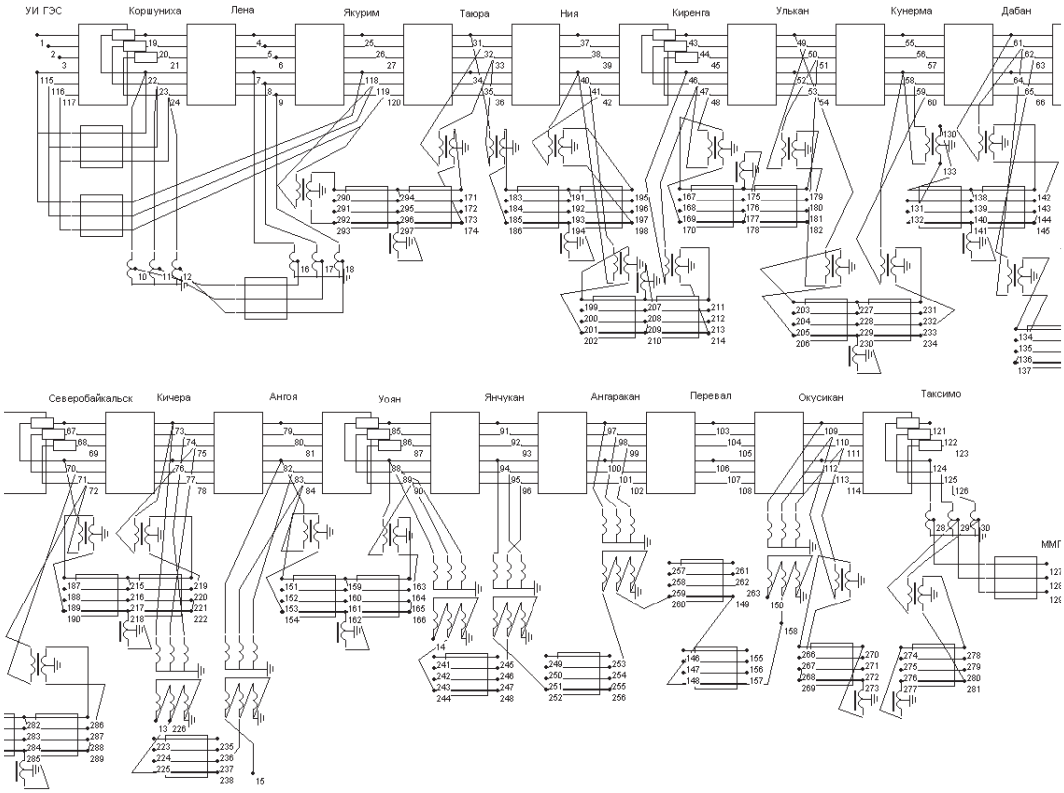


Рис. 5. Расчетная схема.

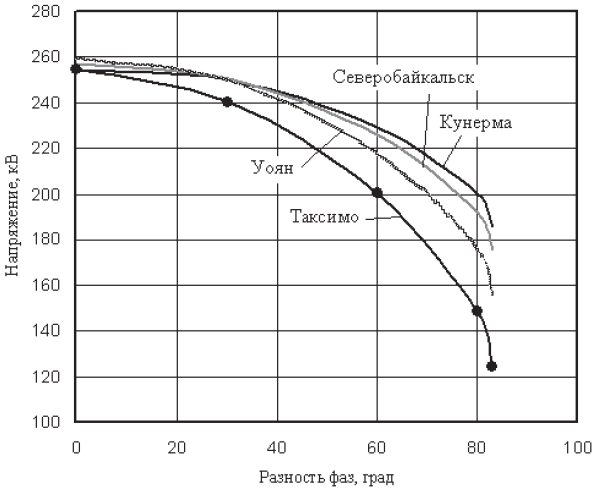


Рис. 6. Зависимость уровня напряжений на подстанциях от угла сдвига фаз.

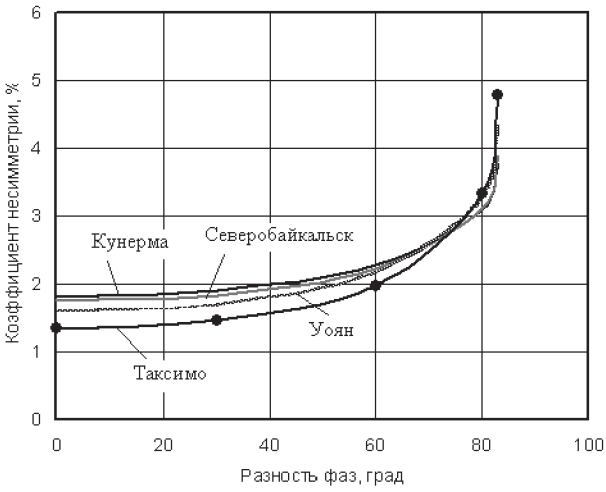


Рис. 7. Зависимость коэффициента несимметрии на подстанциях от угла сдвига фаз.

системы (для СЭС БАМ — подстанция Таксимо).

Заключение

1. Разработана методика моделирования режимов при синхронных качаниях генераторов в трехфазно-однофазных электроэнергетических системах, питающих тяговые подстанции магистральных железных дорог переменного тока.

2. Результаты моделирования показали, что при синхронных качаниях наблюдается значительное снижение напряжения в узловых точках сети и существенный рост несимметрии.

3. Режимы синхронных качаний необходимо учитывать при планировании режимов электроэнергетических систем и настройке устройств релейной защиты и автоматики.

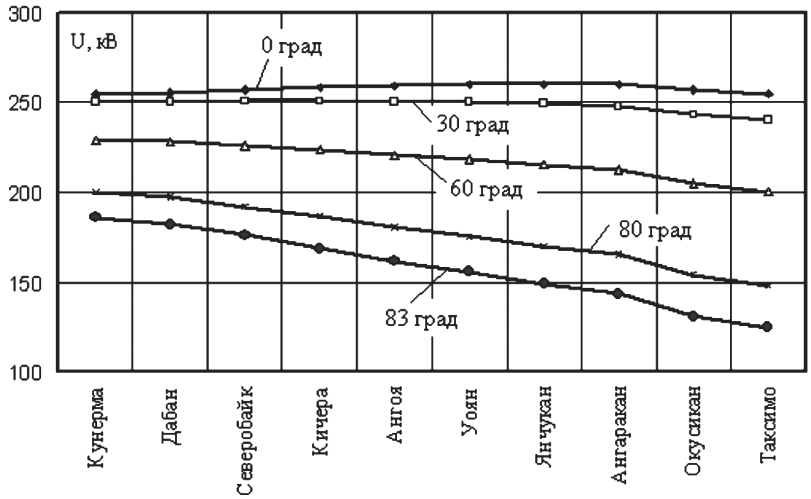


Рис. 8. Изменение напряжений по трассе ЛЭП.

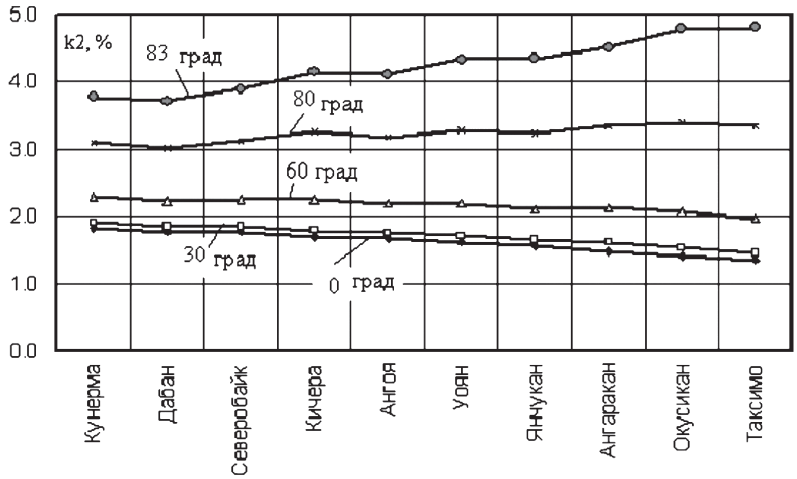


Рис. 9. Изменение коэффициента несимметрии по трассе ЛЭП.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] / В.А. Веников. — М.: Высшая школа, 1978. — 415 с.
2. Горбунова, Л.М. Экспериментальные исследования режимов энергосистем [Текст] / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович и др. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 448 с.
3. B. Stott. Review of load-flow calculation methods // Proceedings of the IEEE. 1974. Vol. 62. № 7.
4. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. - Иркутск: Иркут. ун-т. — 2005. — 273 с.
5. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2005611176 (РФ) «Flow3 — расчеты режимов электрических систем в фазных координатах» / Крюков А.В., Закарюкин В.П. — Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. — Зарегистр. 19.05.2005.
6. Соколов, С.Е. Управляемые ферромагнитные реакторы и их использование для управления режимами протяженных ЛЭП [Текст] / С.Е. Соколов, Г.О. Борисов, А.П. Гусев и др. — Новосибирск: Наука, 1993. — 229 с.

Мадыев А.П., Ширапов Д.Д.

УДК 681.51: 621.398

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ПЕРВОЙ ПРОИЗВОДНОЙ АСИМПТОТИЧЕСКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ ТИПА ПЕРЕХОДНЫЙ РЕЖИМ И АНАЛИЗ ЕЁ ОБЩИХ СВОЙСТВ

В целом ряде прикладных задач автоматического регулирования и обработки сигналов рассматриваются модели асимптотически нестационарных сигналов, порожденных переходными процессами в линейных динамических звеньях (ЛДЗ) от скачкообразных изменений входных стационарных случайных воздействий (ССВ). Известно общее решение только для одного из трех возможных видов переходных режимов, вызванных однократным скачкообразным изменением мгновенных значений входного ССВ, например [1]. Между тем, определенный практический интерес могут представлять как остальные виды переходных режимов, так и общие свойства статистических характеристик реакций ЛДЗ во всех трех режимах.

Рассматриваемая модель нестационарного сигнала содержит две компоненты:

1) источник ССВ с нулевым математическим ожиданием, с нормальным распределением мгновенных значений и заданной корреляционной функцией $R_B(\tau)$;

2) линейное динамическая звено с заданной импульсной характеристикой $h(t)$.

Мгновенные значения реализации ССВ, поступающей на вход ЛДЗ могут однократно меняться скачком следующим образом:

1. от нуля до установившегося значения;
2. от установившегося значения до нуля;
3. смена знака (инверсия) мгновенных значений реализаций на противоположный.

Характер скачков ССВ и взаимодействия ССВ и ЛДЗ показаны на рис. 1. В переходном режиме первого типа ЛДЗ до подачи реализаций ССВ *x(t)* имеет нулевые начальные условия. В режимах второго и третьего типов до скачка ССВ реакция ЛДЗ *S(t)* имеет вид уста-

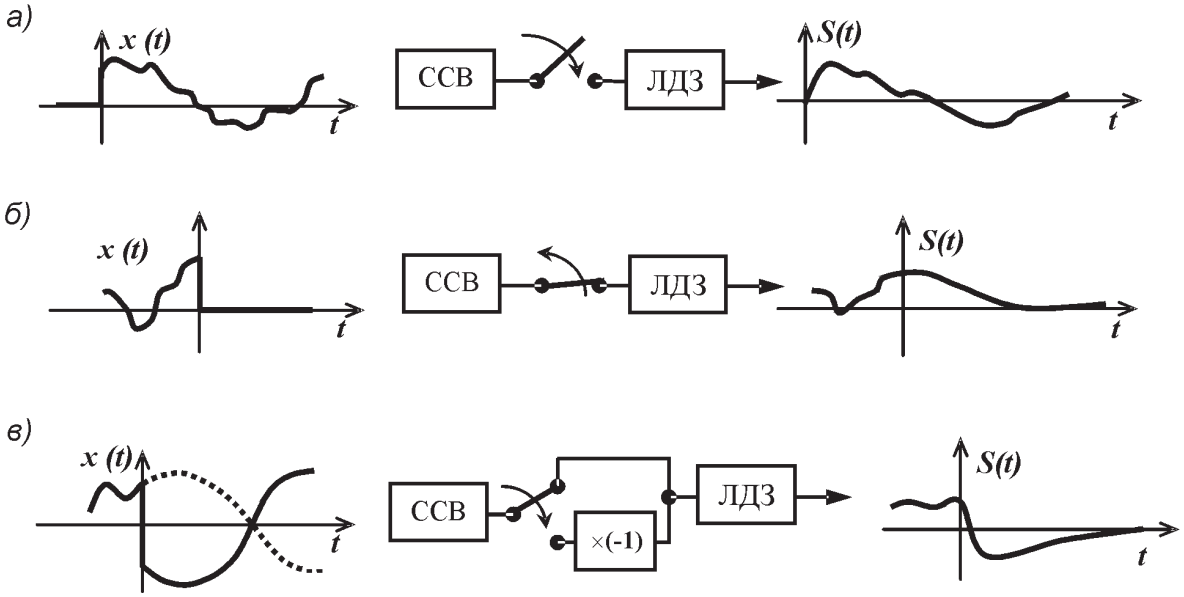


Рис. 1. а) переходный режим первого типа; б) переходный режим второго типа; в) переходный режим третьего типа.

новившегося стационарного случайного сигнала. Для всех режимов нестационарными будут корреляционные функции сигнала-реакции и его производных и, как следствие, соответствующие дисперсии. Между тем для многих задач достаточно определить дисперсию либо самого сигнала, либо ее производной. Одной из таких задач является определение частоты адаптивной дискретизации непрерывных сигналов, где необходимо определить дисперсию первой производной сигнала [2].

Для режима первого типа известно решение для получения корреляционной функции $R_1(t_1,t_2)$ первой производной реакции ЛДЗ:

$$R_1(t_1,t_2)=\frac{\partial^2}{\partial t_1\partial t_2}\times \\ \times\int_0^{t_1}\int_0^{t_2}h(t_1-x)h(t_2-y)R_B(y-x)dxdy. \quad (1)$$

Дисперсия $\sigma_1^2(t)$ первой производной реакции, как известно, находится из $R_1(t_1,t_2)$ при одинаковых значениях аргумента $t_1=t_2=t$. Дифференцируя (1) под знаком интеграла по правилу Лейбница получим:

$$\sigma_1^2(t)=h2(0)\sigma_B^2+2h(0)\int_0^t h'(\mu)R_B(\mu)d\mu+ \\ +\int_0^t\int_0^t h'(\mu)h'(\nu)R_B(\mu-\nu)d\mu d\nu. \quad (2)$$

Для режима второго типа соответствующий скачок ССВ можно представить как суперпозицию двух воздействий: исходного $x(t)$ и скачка $-x(t)$. И тогда справедливо полагать, в ЛДЗ имеют место одновременно два процесса: установившийся $S_1(t)$ от $x(t)$ и переходный режим $S_2(t)$ первого типа от $-x(t)$. Каждый из этих двух процессов протекает независимо друг от друга и, далее, можно рассматривать их как реакции двух ЛДЗ с идентичными параметрами. Выходной сигнал $S(t)$ будет результирующим этих двух реакций и дисперсия первой производной примет вид:

$$\sigma_1^2(t)=\sigma_1^2(\infty)-h^2(0)\sigma_B^2- \\ -2h(0)\int_0^{+\infty}h'(\mu)R_B(\mu)d\mu+ \\ +2\int_0^{+\infty}\int_0^t h'(\mu)h'(\nu)R_B(\nu-\mu)d\mu d\nu+ \\ +\int_0^t\int_0^t h'(\mu)h'(\nu)R_B(\nu-\mu)d\mu d\nu, \quad (3)$$

где σ_B^2 — дисперсия ССВ.

Для режима третьего типа инверсию знака можно представить как суперпозицию двух воздействий: исходного $x(t)$ и скачка $-2x(t)$, а дисперсия первой производной примет вид:

$$\sigma_1^2(t)=\sigma_1^2(\infty)-h^2(0)\sigma_B^2- \\ -4h(0)\int_0^{+\infty}h'(\mu)R_B(\mu)d\mu+ \\ +4h(0)\int_0^{+\infty}h'(\mu)R_B(\mu)d\mu- \\ -4\int_0^{+\infty}\int_0^t h'(\mu)h'(\nu)R_B(\nu-\mu)d\mu d\nu+ \\ +\int_0^t\int_0^t h'(\mu)h'(\nu)R_B(\nu-\mu)d\mu d\nu, \quad (4)$$

Корреляционная функция воздействия имеет два асимптотических значения: а)вырожденная , означающая полную коррелированность воздействия, вырождение его динамики и наиболее узкий спектр мощности; б)«белый шум» (C_0-плотность "белого шума"), означающий полную некоррелированность мгновенных значений воздействия и равномерный спектр мощности в неограниченной полосе частот.

Вырожденная существенно упрощает выражения (2÷4). Для режима первого и второго типа:

$$\sigma_1^2(t)=\sigma_B^2h^2(t), \quad (5)$$

для режима третьего типа:

$$\sigma_1^2(t)=4\sigma_B^2h^2(t), \quad (6)$$

«Белый шум» также упрощает (2÷4). Теперь в режиме первого типа:

$$\sigma_1^2(t)=C_0\int_0^t\left(h'(\nu)\right)^2d\nu, \quad (7)$$

в режиме второго типа:

$$\sigma_1^2(t)=\sigma_1^2(\infty)-C_0\int_0^t\left(h'(\nu)\right)^2d\nu. \quad (8)$$

Переходный режим третьего типа от инверсии «белого шума» отсутствует, поскольку любой скачок амплитуды такого воздействия не отличается от его текущих значений.

Анализ показывает (5÷8) что, при вырождении динамических свойств ССВ (его «замедление» относительно динамики ЛДЗ) $\sigma_1^2(t)$ асимптотически стремится с точностью до постоянного множителя к $h^2(t)$. В частотной области это будет соответствовать сужению

спектра мощности относительно амплитудно-частотной характеристики ЛДЗ.
Аналогичная картина наблюдается и при расширении амплитудно-частотной характеристики ЛДЗ относительно неизменного по ширине спектра мощности ССВ. Очевидно и то, что по мере приближения к этому асимптотическому значению на $\sigma_1^2(t)$ все в меньшей степени будет влиять вид и параметры $R_B(\tau)$ и, напротив, в большей мере будут влиять вид и параметры $h(t)$.

Свойства полученной дисперсии в случае вырожденного ССВ очевидны:

а) моменты времени $t_э$, экстремумов совпадают с моментами времени экстремумов $h(t)$;

б) локальные максимумы дисперсии, равные $\sigma_B^2 h^2(t_э)$, совпадут по времени со всеми экстремумами импульсной переходной функции;

в) минимумы дисперсии, равные 0, совпадут по времени с моментами перехода $h(t)$ через 0;

г) в момент включения воздействия ;

д) установившееся значение .

В режимах от «белого шума» свойства $\sigma_1^2(t)$ не столь очевидны и поэтому необходимо продифференцировать (7÷8) по t с целью нахождения возможных экстремумов. В результате получим следующее выражение:

$$\left[\sigma_1^2(t)\right]' = C_0\left[h'(t)\right]^2.$$

В этом случае производная дисперсии для любого t положительна либо равна 0, что определяет характер экстремумов $\sigma_1^2(t)$ как точек перегиба, т.е. экстремумы не являются ни максимумами, ни минимумами. Моменты времени $t_э$ их появления совпадают по времени с экстремумами $h(t)$, поскольку находятся из уравнения $h'(t)=0$.

Таким образом, при усилении динамики ССВ (его «убыстрения» относительно ЛДЗ) переходный режим по дисперсии асимптотически приближается к монотонному без выбросов над установившимся значением. При этом (как и в случае подачи вырожденного ССВ) по мере приближения к данному асимптотическому значению на $\sigma_1^2(t)$ все в меньшей степени будет влиять вид и параметры $R_B(\tau)$ и напротив в большей мере будут влиять вид и параметры $h(t)$. Заметим, что в момент включения такого воздействия $b_1^2(0)=0$.

Для исследования свойств $\sigma_1^2(t)$ для $R_B(\tau)$ произвольного вида продифференцируем по t с учетом правила Лейбница функционалы (2÷4), приравняем полученные выражения к 0 и получаем следующие уравнения, по которым можно установить наличие и характер хотя бы части экстремумов $\sigma_1^2(t)$.

Для <u>первого режима</u>:

$$\sigma_1^2(t)' = h'(t)\left(2h(0)R_B(t) + \int_0^t h'(\nu)R_B(t-\nu)d\nu\right) = 0, \quad (9)$$

для <u>второго режима</u>:

$$\sigma_1^2(t)' = h'(t)\times$$
$$\times\left(\int_0^t h'(\mu)R_B(t-\mu)d\mu - 2\int_0^{+\infty} h'(t)R_B(t-\mu)d\mu\right) = 0, \quad (10)$$

и для <u>третьего режима</u>:

$$\sigma_1^2(t)' = h'(t)\left(h(0)R_B(t) - \int_0^{+\infty} h'(\mu)R_B(t-\mu)d\mu + \right.$$
$$\left. + \int_0^t h'(\mu)R_B(t-\mu)d\mu\right) = 0. \quad (11)$$

Как следует из (9÷11), производная дисперсии состоит из 2-х сомножителей, причем первый из них определяется только свойствами ЛДЗ. Отсюда следует, что часть экстремумов самой дисперсии совпадет по времени с экстремумами $h(t)$, поскольку одним из решений уравнений (9÷11) является решение уравнения $h'(t)=0$.

Расположение во времени другой части экстремумов определяется уже не только свойствами $h(t)$, но и свойствами $R_B(\tau)$, входящими в подынтегральное выражение 2-х сомножителей (9÷11). По виду 2-го сомножителя в (9) можно уточнить характер этих экстремумов. Так, двумя асимптотическими значениями интеграла, являющимися вторым сомножителем в (9), будут $0{,}5h'(t)$ и $h(t)$ для асимптотических значений R_B соответственно δ-функции и вырожденной. Нетрудно убедиться, что для знакопостоянной R_B ($C_0\delta(t) < R_B(\tau) \le \sigma_B$) второй сомножитель в любой момент времени t не выйдет за пределы своих асимптотических значений и, следовательно, в целом сохранится картина распределения во времени локальных максимумов дисперсии, характерная для вырожденного воздействия, т.е. все локальные максимумы дисперсии по времени совпадут со всеми максимумами $h(t)$. Вид и параметры зна-

копостоянной $R_B(\tau)$ будут влиять только на величину этих локальных максимумов, а также на расположение и величину локальных минимумов $\sigma_1^2(t)$. Знакопеременная R_B может вывести интеграл в (9) за пределы асимптотических значений в некоторые моменты времени и это может, в свою очередь, привести к изменению картины распределения локальных максимумов дисперсии, но при этом часть экстремумов дисперсии по-прежнему будет совпадать по времени с экстремумами $h(t)$.

В начале всех режимов (при $t=0$) на выходе ЛДЗ первого порядка дисперсия производной скачком принимает значение, величина которого определяется параметрами как $h(t)$, так и $R_B(\tau)$. Для систем второго порядка и выше переходный режим начинается без скачка и начальное значение дисперсии производной определяется только предшествующим состоянием. Дальнейший анализ выражений (9÷11) в общем виде невозможен из-за математических ограничений.

ВЫВОДЫ

1. Для любого ЛДЗ и в любом из рассмотренных режимов при воздействии с корреляционной функцией общего вида часть экстремумов $\sigma_1^2(t)$ совпадают по времени с экстремумами $h(t)$ ЛДЗ.

2. Для рассмотренных режимов расширение спектра ССВ при постоянстве его дисперсии и параметров ЛДЗ асимптотически устремляет переходный процесс по $\sigma_1^2(t)$ к монотонному, а в третьем режиме приводит к исчезновению переходного режима. По мере сужения спектра воздействия появляются и растут выбросы по $\sigma_1^2(t)$, причем в третьем режиме амплитуда выбросов выше, чем в первом. При значительной спектральной разнице между ЛДЗ и ССВ параметры переходного режима определяются практически только свойствами импульсной характеристики ЛДЗ.

3. В начале всех режимов на выходе ЛДЗ 1-го порядка $\sigma_1^2(t)$ скачком принимает значение, отличное как от начального так и от конечного значений переходного режима. Величина скачка определяется параметрами как ЛДЗ, так и ССВ. Для ЛДЗ 2-го порядка и выше переходный режим начинается без скачка и начальное значение $\sigma_1^2(t)$ определяется предшествующим состоянием.

4. Для ЛДЗ 2-го порядка и выше и знакопостоянной R_B в переходном режиме 1-го типа максимумы $\sigma_1^2(t)$ совпадают с максимумами $h(t)$ ЛДЗ. Вид и параметры знакопостоянной $R_B(\tau)$ не влияют на расположение максимумов $\sigma_1^2(t)$.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Шахтарин Б.И.. Случайные процессы в радиотехнике: Цикл лекций. — М.: Радио и связь, 2000. - 468 с.
2. Адаптивные телеизмерительные системы/Б.Я.Авдеев, Е.М.Антонюк и др. — Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. - 314 с.

Дмитриева Т.Л.

УДК 64.8

АППРОКСИМАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ, ПОДВЕРЖЕННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Сформулируем задачу оптимального проектирования конструкций, подверженных нестационарным динамически воздействиям в следующем виде:

найти $\min \; f(x, P(x,t)), \quad x \in E^n$ (1)

при ограничениях $g_j\left(x, P\left(x,t\right)\right) \le 0, \; j = 1,2 \ldots m;$ (2)

$$x_i^L \le x_i \le x_i^U, i = 1,2 \ldots n. \quad (3)$$

Пусть параметры состояния $P(x,t)$ связаны с динамическими перемещениями, скоростями, ускорениями

$$\left\{P\left(x,t\right)\right\} = \varphi\left(\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}\right), \delta \in E^1, \quad (4)$$

которые в свою очередь определяются решением системы дифференциальных уравнений метода конечных элементов

$$\left[M\right]\left\{\ddot{\delta}\right\} + \left[C\right]\left\{\dot{\delta}\right\} + \left[K\right]\left\{\delta\right\} = \left\{R\left(x,t\right)\right\} \quad (5)$$

с начальными условиями $\left\{\delta(0)\right\}, \left\{\dot{\delta}(0)\right\}$, не зависящими от x. Таким образом, параметры состояния являются неявными функциями варьируемых параметров. Для того, чтобы задача (1-3) могла быть решена методами математического программирования, необходимо: во-первых, исключить зависимость целевой и ограничительных функций от времени, во-вторых, получить явную зависимость этих функций от варьируемых параметров.

Для исключения времени из функций ограничений используем следующий подход. Будем рассматривать только те моменты времени T_j, при которых ограничения (2) достигают своих экстремальных значений. Тогда в другие моменты времени ограничения заведомо выполняются. Подобный подход в несколько иной постановке был исследован в монографии [1].

Условия, определяющие T_j, зададим в виде

$$h_j(x, P(T_j)) = 0, \quad (6)$$

где функция h_j может быть определена, например, следующим образом

$$h_j(x, P(T_j)) = \max(g_i(x, P(T_j))). \quad (7)$$

При этом должны выполняться условия, которые задают единственность T_j, хотя бы в локальной области

$$\dot{h}_j\left(x, P\left(T_j\right)\right) \ne 0. \quad (8)$$

Для получения явной зависимости функций ограничений от x, их обычно линеаризуют [1]. Скорость сходимости при этом существенно зависит от нелинейности ограничительных функций, которая обусловлена двумя различными факторами. Во-первых, параметры состояния имеют довольно сложную зависимость от x, связанную со структурой механических систем. Во-вторых, сами ограничения, как правило, нелинейно связаны с параметрами состояния. Тогда аппроксимация параметров состояния может дать более качественные приближения, чем аппроксимация самих функций $\{g\}$, поскольку в последних сохраняются нелинейности второго типа. Это позволяет использовать полученные аппроксимации в более широкой области пространства варьируемых параметров, что, в конечном итоге, приводит к значительному сокращению числа итераций, требуемых для поиска оптимума.

Линеаризация параметров состояния может быть выполнена путем разложения их в ряд Тейлора в окрестности точки x

$$\tilde{P}_k(x,T) = P_k(x^{\cdot},T) + \left\{\frac{\partial P_k}{\partial x}\right\}^T_{x=x^{\cdot}} \left\{x - x^{\cdot}\right\}. \quad (9)$$

Коэффициенты аппроксимации вычисляются на основе методов анализа чувствительности. Представим здесь два метода анализа чувствительности: метод прямого дифференцирования и дифференцирование через сопряженные переменные.

Запишем выражение для полной производной k-го параметра состояния по x_i, учитывая при этом, что время T является неявной функцией от x. Для простоты записи индекс j у времени T будем опускать

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i} = \frac{\partial P_k(T)}{\partial x_i} + \frac{\partial P_k}{\partial T}\frac{dT}{dx_i}. \quad (10)$$

Производную $\frac{dT}{dx_i}$ найдем дифференцированием соотношения (6) по x_i

$$\frac{\partial h}{\partial P_k}\left(\frac{\partial P_k}{\partial x_i} + \frac{\partial P_k}{\partial T}\frac{dT}{dx_i}\right) + \frac{\partial h}{\partial x_i} = 0. \quad (11)$$

Выразим отсюда $\frac{dT}{dx_i}$, считая, что $\frac{\partial h}{\partial P_k}\frac{P_k}{T} = \dot{h}(T)$

$$\frac{dT}{dx_i} = \frac{-\left(\frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\partial h}{\partial P_k}\frac{\partial P_k}{dx_i}\right)}{\dot{h}(T)}. \quad (12)$$

Рассмотрим первый случай, когда k-й параметр состояния зависит только от перемещений системы

$$P_k(T) = \{\alpha_k\}^T \{\delta(T)\}. \quad (13)$$

Тогда частную производную $\frac{dP_k(T)}{dx_i}$, входящую в выражения (10), (12), можно найти дифференцированием выражения (13) по x_i, считая при этом, что время T остается постоянным

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i} = \left\{\frac{\partial \alpha_k}{\partial x_i}\right\}^T \{\delta(T)\} + \{\alpha_k\}^T \left\{\frac{\partial \delta(T)}{\partial x_i}\right\}. \quad (14)$$

Основную сложность в выражении (14) представляет собой вычисление производных $\left\{\frac{\partial \delta(T)}{\partial x_i}\right\}$. Первый способ определения этой производной заключается *в* непосредственном дифференцировании уравнения (5) по x_i (прямой метод анализа чувствительности):

$$[M]\left\{\frac{\partial \ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\} + [C]\left\{\frac{\partial \dot{\delta}}{\partial x_i}\right\} + [K]\left\{\frac{\partial \delta}{\partial x_i}\right\} = \{F_i\}, \quad (15)$$

где вектор псевдонагрузки находится из выражения

$$\{F_i\} = \left\{\frac{\partial R}{\partial x_i}\right\} - \left[\frac{\partial M}{\partial x_i}\right]\{\ddot{\delta}\} - \left[\frac{\partial C}{\partial x_i}\right]\{\dot{\delta}\} + \left[\frac{\partial K}{\partial x_i}\right]\{\delta\} \quad (16)$$

с начальными условиями $\left\{\frac{\partial \dot{\delta}(0)}{\partial x_i}\right\}$, $\left\{\frac{\partial \delta(0)}{\partial x_i}\right\}$, равными нулю.

Трудоемкость прямого метода пропорциональна числу варьируемых параметров. Между тем, в задачах оптимизации конструкций число активных ограничений значительно меньше числа варьируемых параметров. Это обусловлено нелинейностью целевой и ограничительных функций, а также выходом некоторых варьируемых параметров на границу параметрических ограничений (3). Тогда, при стабилизации числа активных ограничений более эффективным становится метод сопряженных переменных.

Для получения производной $\frac{dP_k(T)}{dx_i}$ через сопряженные переменные второе слагаемое в выражении (14) преобразуем к интегральной форме. При этом считается, что $\left\{\frac{\partial \delta(0)}{\partial x_i}\right\} = 0$, а

$$\{\alpha_k\}^T \left\{\frac{\partial \delta(T)}{\partial x_i}\right\} = \int_0^T \{\alpha_k\}^T \left\{\frac{\partial \dot{\delta}(t)}{\partial x_i}\right\} dt. \quad (17)$$

Запишем развернутое выражение для $\frac{dP_k(T)}{dx_i}$ с учетом (14) и (17) -

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i} = \left\{\frac{\partial \alpha_k}{\partial x_i}\right\}^T \{\delta(T)\} + \int_0^T \{\alpha_k\}^T \left\{\frac{\partial \dot{\delta}(t)}{\partial x_i}\right\} dt -$$
$$-\{\alpha_k\}^T \{\dot{\delta}(T)\}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\partial h}{\partial P_k}\left(\left\{\frac{\partial \alpha_k}{\partial x_i}\right\}^T \{\delta(T)\} + \right.\right. \quad (18)$$
$$\left.\left. + \{\alpha_k\}^T \left\{\frac{\partial \delta(T)}{\partial x_i}\right\}\right)\right) / \dot{h}(T).$$

Исключим из этого выражения производные $\left\{\frac{\partial \dot{\delta}(t)}{\partial x_i}\right\}$ $\left\{\frac{\partial \delta(T)}{\partial x_i}\right\}$. Для этого умножим уравнение (15) слева на сопряжённый вектор

$\left\{\dot{\beta}_k(t)\right\}$ и проинтегрируем его левую и правую часть от *0* до *T*:

$$\int_0^T\left(\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T[M]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}+\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}+\right.$$
$$\left.+\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\right)dt=\int_0^T\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T[F]dt. \quad (19)$$

Первое и третье слагаемое левой части равенства проинтегрируем по частям. Затем, используя свойство симметрии матриц *[M], [C]* и *[K]*, приведём выражение (19) к виду

$$\int\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\left([M]\left\{\ddot{\beta}_k\right\}-[C]\left\{\dot{\beta}_k\right\}+[K]\{\beta_k\}\right)dt=$$
$$=-\int_0^T\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T\{F_i\}dt+\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T[M]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T+ \quad (20)$$
$$+\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T.$$

Пусть функция β_k удовлетворяет системе уравнений

$$[M]\left\{\ddot{\beta}_k\right\}-[C]\left\{\dot{\beta}_k\right\}+[K]\{\beta_k\}=\{\alpha_k\}. \quad (21)$$

Для конечного момента времени *T* примем следующие условия

$$\{\beta_k(T)\}=[K]^{-1}\{\alpha_k\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}\{\alpha_k\}\frac{\partial h}{\partial P_k}/\dot{h}(T),$$
$$\left\{\dot{\beta}_k(T)\right\}=0. \quad (22)$$

Тогда -

$$\int_0^T\{\alpha_k\}^T\left\{\frac{\partial\dot{\delta}(T)}{\partial x_i}\right\}=-\int_0^T\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T\{F_i\}dt+$$
$$+\{\alpha_k\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}\{\alpha_k\}^T\left\{\frac{\partial\delta(T)}{\partial x_i}\right\}\frac{\partial h}{\partial P_k}/\dot{h}(T). \quad (23)$$

Запишем окончательные выражения для коэффициентов чувствительности через сопряжённые переменные

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i}=\left\{\frac{\partial\alpha_k}{\partial x_i}\right\}^T\{\delta(T)\}-\int_0^T\left\{\dot{\beta}_k\right\}^T\{F_i\}dt-$$
$$-\{\alpha_k\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}+\frac{\partial h}{\partial P_k}\left\{\frac{\partial\alpha_k}{dx_i}\right\}^T\{\delta(T)\}\right)/\dot{h}(T). \quad (24)$$

Рассмотрим теперь случай, когда параметры состояния являются функциями скоростей и ускорений. Использование метода прямого дифференцирования при этом не вызывает особых затруднений, так как производные $\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\},\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}$ можно получить интегрированием уравнений (15). Реализация же метода сопряжённых переменных имеет некоторые особенности.

Пусть *k*-й параметр состояния зависит от скорости:

$$P_k(T)=\{\overline{\alpha}_k\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}. \quad (25)$$

Запишем выражение для частной производной $\frac{dP_k(T)}{dx_i}$, входящей в выражения (12)

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i}=\left\{\frac{\partial\overline{\alpha}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}+\{\overline{\alpha}_k\}^T\left\{\frac{\partial\dot{\delta}(T)}{\partial x_i}\right\}. \quad (26)$$

Для второго слагаемого сделаем преобразования, подобные (17), с учётом того, что $\left\{\frac{\partial\dot{\delta}(0)}{\partial x_i}\right\}=0$, а

$$\{\overline{\alpha}_k\}^T\left\{\frac{\partial\dot{\delta}(T)}{\partial x_i}\right\}=\int_0^T\{\overline{\alpha}_k\}^T\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}(t)}{\partial x_i}\right\}dt. \quad (27)$$

Тогда выражение для полной производной $\frac{dP_k(T)}{dx_i}$ будет иметь вид

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i}=\left\{\frac{\partial\overline{\alpha}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}+\int_0^T\{\overline{\alpha}_k\}^T\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}(t)}{\partial x_i}\right\}dt-$$
$$-\{\overline{\alpha}_k\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}+\frac{\partial h}{\partial P_k}\left(\left\{\frac{\partial\overline{\alpha}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}+\right.\right. \quad (28)$$
$$\left.\left.+\{\overline{\alpha}_k\}^T\left\{\frac{\partial\dot{\delta}(T)}{\partial x_i}\right\}\right)\right)/\dot{h}(T).$$

Для исключения производных $\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}(t)}{\partial x_i}\right\},\left\{\frac{\partial\dot{\delta}(T)}{\partial x_i}\right\}$ из (28) домножим уравнение (15) на сопряжённый вектор $\left\{\overline{\beta_k}(t)\right\}$ и произведём интегрирование от *0* до *T*

$$\int_0^T\left(\left\{\ddot{\overline{\beta}}_k\right\}^T[M]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}+\left\{\ddot{\overline{\beta}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}+\right.$$
$$\left.+\left\{\ddot{\overline{\beta}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\right)dt=\int_0^T\left\{\ddot{\overline{\beta}}_k\right\}^T[F]dt. \quad (29)$$

Второе и третье слагаемое проинтегрируем по частям

$$\int_o^T\left(\left\{\ddot{\bar{\beta}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right)dt=$$
$$=-\int_0^T\left(\left\{\dot{\bar{\beta}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}dt+\left\{\dot{\bar{\beta}}_k\right\}[C]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right|_0^T. \quad (30)$$

$$\int_o^T\left(\left\{\ddot{\bar{\beta}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\right)dt=$$
$$=-\int_0^T\left(\left\{\dot{\bar{\beta}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}dt+\left\{\dot{\bar{\beta}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\right|_0^T=$$
$$=-\int_0^T\left(\left\{\bar{\beta}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}dt-\left\{\bar{\beta}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right|_0^T+ \quad (31)$$
$$+\left\{\dot{\bar{\beta}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T.$$

Условия в момент времени T примем следующие

$$\left\{\bar{\beta}_k(T)\right\}^T=[K]^{-1}\{\bar{\alpha}_k\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\}\{\bar{\alpha}_k\}\frac{\partial h}{\partial P_k}/\dot{h}(T);$$
$$\left\{\dot{\bar{\beta}}_k(T)\right\}=0. \quad (32)$$

В результате получим окончательное выражение $\frac{dP_k(T)}{dx_i}$ через сопряжённые переменные

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i}=\left\{\frac{\partial\bar{\alpha}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}+\int_0^T\left\{\ddot{\bar{\beta}}_k\right\}^T\{F_i\}dt-$$
$$-\{\bar{\alpha}_k\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}+\frac{\partial h}{\partial P_k}\left\{\frac{\partial\bar{\alpha}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\dot{\delta}(T)\right\}\right)/\dot{h}(T), \quad (33)$$

где вектор $\left\{\ddot{\bar{\beta}}_k\right\}$ определяется решением системы уравнений

$$[M]\left\{\ddot{\bar{\beta}}_k\right\}-[C]\left\{\dot{\bar{\beta}}_k\right\}+[K]\left\{\bar{\beta}_k\right\}=\{\bar{\alpha}_k\} \quad (34)$$

с начальными условиями (32).

И наконец, рассмотрим зависимость параметров состояния от ускорений

$$P_k(T)=\left\{\bar{\bar{\alpha}}_k\right\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\}. \quad (35)$$

Выражение полной производной в этом случае следующее

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i}=\left\{\frac{\partial\bar{\bar{\alpha}}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\}+\int_0^T\left\{\bar{\bar{\alpha}}_k\right\}^T\left\{\frac{\partial\delta(t)}{\partial x_i}\right\}dt+$$
$$+\left\{\bar{\bar{\alpha}}_k\right\}^T\left\{\frac{\partial\delta(0)}{\partial x_i}\right\}-\left\{\frac{\partial\bar{\bar{\alpha}}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}+\frac{\partial h}{\partial P_k}\times\right. \quad (36)$$
$$\left.\times\left(\left\{\frac{\partial\bar{\bar{\alpha}}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\}+\left\{\bar{\bar{\alpha}}_k\right\}^T\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}(T)}{\partial x_i}\right\}\right)\right)/\dot{h}(T).$$

Умножим уравнение (15) на вектор $\left\{\dddot{\bar{\beta}}(t)\right\}$ и проинтегрируем его от *0* до *T*

$$\int_0^T\left(\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[M]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}+\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}+\right.$$
$$\left.+\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\right)dt=\int_0^T\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[F_i]dt. \quad (37)$$

Произведём интегрирование по частям для каждого слагаемого левой части

$$\int_0^T\left(\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[M]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right)dt=\int_0^T\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[M]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}dt+$$
$$+\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[M]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T, \quad (38)$$

$$\int_o^T\left(\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right)dt=$$
$$=-\int_0^T\left(\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}dt+\left\{\ddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right|_0^T=$$
$$=\int_0^T\left(\left\{\dot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\dddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}dt-\left\{\dot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right|_0^T+ \quad (39)$$
$$+\left\{\ddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[C]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T,$$

$$\int_o^T\left(\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\right)dt=$$
$$=-\int_0^T\left(\left\{\dddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}dt+\left\{\ddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\right|_0^T=$$
$$=\int_0^T\left(\left\{\dot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right)dt-\left\{\dot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right|_0^T+$$
$$+\left\{\ddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T=-\int_0^T\left(\left\{\bar{\bar{\beta}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\right)dt+ \quad (40)$$
$$+\left\{\bar{\bar{\beta}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\ddot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T-\left\{\dot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\dot{\delta}}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T+$$
$$+\left\{\ddot{\bar{\bar{\beta}}}_k\right\}^T[K]\left\{\frac{\partial\delta}{\partial x_i}\right\}\Bigg|_0^T.$$

Будем использовать следующие условия в момент времени T

$$\left\{\overline{\overline{\beta}}_k(T)\right\}^T = [K]^{-1}\left\{\overline{\overline{\alpha}}_k\right\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\}\left\{\overline{\overline{\alpha}}_k\right\}\frac{\partial h}{\partial P_k}/\dot{h}(T);$$
$$\left\{\dot{\overline{\overline{\beta}}}_k(T)\right\} = 0. \qquad (41)$$

Тогда, после соответствующих преобразований получим

$$\frac{dP_k(T)}{dx_i} = \left\{\frac{\partial\overline{\overline{\alpha}}_k}{\partial x_i}\right\}^T\left\{\ddot{\delta}(T)\right\} - \int_0^T\left\{\dddot{\overline{\overline{\beta}}}_k\right\}^T\{F_i\}dt +$$
$$+\left\{\overline{\overline{\beta}}_k(T)\right\}^T\{F_i(T)\} - \left\{\overline{\overline{\alpha}}_k\right\}^T\left\{\dddot{\delta}(T)\right\}\times \qquad (42)$$
$$\times\left(\frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\partial h}{\partial P_k}\left(\left\{\frac{\partial\overline{\overline{\alpha}}_k}{\partial x_i}\right\}^T\{\delta(T)\}\right)\right)/\dot{h}(T),$$

где вектор $\overline{\overline{\beta}}_k$ должен соответствовать системе уравнений

$$[M]\left\{\ddot{\overline{\overline{\beta}}}_k\right\} - [C]\left\{\dot{\overline{\overline{\beta}}}_k\right\} + [K]\left\{\overline{\overline{\beta}}_k\right\} = \left\{\overline{\overline{\alpha}}_k\right\} \qquad (43)$$

с начальными условиями (41).

Существенное преимущество метода сопряжённых переменных заключается в том, что число решений системы уравнений (21) определяется числом параметров состояния, входящих в активные ограничения. Кроме того, система (21) намного проще чем (15), так как вектор $\{\alpha_k\}$ не зависит от времени. Некоторое неудобство вызывает то обстоятельство, что собственные формы колебаний для уравнений (5) и (21) не совпадают за счет знака при коэффициенте *[C]*. В таком чае целесообразно произвести замену переменных

$$t = T - \tau \qquad (44)$$

и выразить вектор $\{\beta\}$, а также его производные через τ

$$\beta(t) = \beta(T-\tau) = \beta^*(\tau),$$
$$\dot{\beta}(t) = \frac{\partial\beta}{\partial\tau}\frac{\partial\tau}{\partial t} = -\ddot{\beta}^*(\tau), \qquad (45)$$
$$\ddot{\beta}(t) = \frac{\partial(-\beta(\tau))}{\partial\tau} = -\dddot{\beta}^*(\tau).$$

Тогда уравнение (21) в новых переменных будет иметь следующий вид

$$[M]\left\{\ddot{\beta}^*_\kappa(\tau)\right\} - [C]\left\{\dot{\beta}^*_\kappa(\tau)\right\} + [K]\left\{\beta^*_\kappa(\tau)\right\} = \{\alpha_k\} \qquad (46)$$

с начальными условиями

$$\{\beta_k(0)\} = [K]^{-1}\{\alpha_k\}^T\left\{\dot{\delta}(0)\right\}\{\alpha_k\}\frac{\partial h}{\partial P_k}/\dot{h}(0);$$
$$\left\{\dot{\beta}_k(0)\right\} = 0. \qquad (47)$$

Аналогичным образом делаются преобразования для уравнений (34), (43).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Хог Э., Арора Я.С. Прикладное оптимальное проектирование: Механические системы и конструкции: М!, Мир, 1983. - 478 с.

Министерство Образования и Науки Российской Федерации
Министерство Транспорта
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

Раздел 3.

Системный анализ и междисциплинарные подходы в исследованиях.

Содержание научного журнала:

- Инженерная механика
- Транспортные средства
- Энергетика и электромеханика
- Строительство, материалы и конструкции
- Охрана окружающей среды
- Автоматизация технологических процессов
- Современные технологии
- Системный анализ
- Моделирование технических систем
- Транспортные системы
- Энергоснабжение и электромеханика
- Управление техническими системами
- Информационные технологии
- Экономика безопасности и качества

ОТ РЕДАКЦИИ

Редакция поздравляет академика Ф.А. Летникова с присуждением ему премии Правительства Российской Федерации 2006 года в области науки и техники (Постановление Правительства Российской Федерации от 22 февраля 2007 года № 121, г. Москва).

Премия присуждена за разработку и внедрение системного экологического мониторинга как компонента стратегической безопасности. Правительство высоко оценило труд большого коллектива, в составе которого серьезный вклад принадлежит Ф.А. Летникову. Редакция представляет вниманию читателей вторую главу «**Синергетика природных и техногенных воздействий на человека**» в монографии «**Экология человека в изменяющемся мире**» / Колл. авторов. Екатеринбург. — УРО РАН. — 2006. — ISBN 5-7691-1621-8.

На междисциплинарном уровне рассмотрено становление и развитие экологии человека. Предложены концепция уровней организации жизни и вариантов экологических воздействий, системы поддержания гомеостаза организма и механизмы формирования толерантной стратегии адаптации. Изложены основы нового научного направления синергетики среды обитания человека. Показаны свойства этой среды — ее нелинейность, способность к самоорганизации и хаотизации. Детально обсуждаются вопросы, связанные с ритмами в биосфере. Проанализировано множество временных рядов, характеризующих процессы в биосфере, а также временных рядов различных медицинских показателей. Систематизирована феноменология биосферной ритмологии, показано многообразие этих ритмов, определены их свойства, в том числе переменная полиритмичность. Выделены некоторые механизмы влияния природной, антропогенной и социальной сред на здоровье и качество жизни людей. Рассмотрены конкретные данные по влиянию воздействий загрязнений окружающей среды на заболеваемость населения Севера России. Обоснована концепция комплексного космическо-геодинамическо-эеологическо-социально-медицинского (медико-экологического) мониторинга как важнейшего приоритета национальной безопасности и устойчивого развития страны. Показана эффективность технологии геоинформационных систем в реализации медико-экологического мониторинга. Рассмотрена эволюция взглядов на посттравматические стрессовые расстройства у участников и жертв вооруженных конфликтов и террористических актов, предложена оригинальная модель развития психологического стресса в условиях участия в боевых действиях и обоснованы варианты лечебно-реабилитационных маршрутов. Раскрыта социальная экология зависимых форм поведения, выделены основные механизмы и концепции генеза зависимости от психоактивных веществ, модели и стратегии развития наркологической превентологии. Обосновано отнесения тоталитарных культов к психическому терроризму как несмертельному оружию массового поражения.

Для медиков и биологов, психологов и социологов, экологов, географов и геофизиков.

Авторский коллектив:

акад. РАМН Н.А. Агаджанян, д.ф.м.н. С.И. Александров, к.ф.м.н. О.И. Оптикаева, к.м.н. Т.В. Гаврилова, д.ф.м.н. А.Г. Гамбурцев, к.г.м.н. С.П. Главатских, член-корр. РАН В.А. Грачев, акад. РАМН Т.Б. Дмитриева, д.т.н. Е.А. Жалковский, д.г.м.н. Г.П. Киселев, акад. РАН Ф.А. Летников, к.ф.м.н. О.В. Олейник, д.филос.н. В.Н. Расторгуев, акад. РАМН П.И. Сидоров, акад. РАН и РАМН В.А. Черешнев, член-корр. РАН Ф.Н. Юдахин

Рецензенты:

акад. РАМН Ф.И. Комаров, докт. геол.-минер. наук Г.И. Рейснер.

Летников Ф.А.

УДК 699:32/34

СИНЕРГЕТИКА ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЧЕЛОВЕКА

ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ

В конце XX в. сформировался принципиально новый синергетический подход к анализу широкого спектра природных явлений. Основоположником этого научного направления является физик Герман Хакен, статья которого "Кооперативные явления в сильно неравновесных и нефизических системах", опубликованная в 1975 г. в журнале "Review of Modern Physics", знаменует собой начало исследований по синергетике.

В работах по синергетике излагаются общие подходы к изучению роли коллективных, кооперативных эффектов, в том числе и процессов самоорганизации, в открытых неравновесных системах.

Проблема синергетики среды обитания человека впервые обсуждалась Ф.А. Летниковым 11 ноября 1997 г. в Москве на конференции РФФИ "Науки о Земле на пороге XXI века" и нашла дальнейшее развитие в ряде публикаций автора (Летников, 1998, 2002, 2003, 2004а, б). Следует заметить, что принцип синергетики требует строго выдерживать значения используемых терминов. В противном случае, как это, к сожалению, имеет место, происходит вульгаризация синергетического подхода и дискредитация самой синергетики. Поэтому мы очень кратко обозначим смысл применяемых терминов.

Открытая система обменивается с окружающей средой веществом, энергией и информацией.

Необходимо различать **организацию** и **самоорганизацию** (табл. 2.1). Отличительные черты систем, в которых проявляется самоорганизация: нелинейность, неравновесность, обратная связь, неустойчивость стационарного состояния, стохастичность. Наиболее общей чертой нелинейных систем является нарушение в них принципа суперпозиции - когда аддитивность причин приводит к аддитивности следствий (Гапонов-Грехов, Рабинович, 1984). Наиболее характерная черта нелинейных систем - неадекватность силы воздействия отклику на это воздействие, отсюда

Таблица 2.1.

Термины синергетики.

Синергетика - совместное действие, кооперация процессов в открытых линейных и нелинейных неравновесных динамических системах	**Деструкция** — переход от структуры к хаосу - рост энтропии
Синергизм - содействие, сопряжение, кооперация объектов и процессов, сил и потоков вещества и энергии	**Организация** - снижение хаоса, уменьшение энтропии, структурирование за счет приложения внешних сил
Самоорганизация - одна из форм синергизма, переход из хаоса в структурированное состояние за счет **внутренней** энергии системы (снижение энтропии)	**Реорганизация** - переход от одной формы организации к другой

недетерминированность (многовариантность) путей их развития (стохастичность).

В. Эшби (Asbby, 1977) определил два смысла для понятия "самоорганизация": общий и частный. **Общий** - это переход от системы с независимыми частями к системе с зависимыми друг от друга частями (т. е. появление связности). **Частный** - это переход от плохой организации к хорошей, хотя при этом учитывается, что не бывает хорошей организации в абсолютном плане.

В ряде работ по синергетике говорится о **равновесном** состоянии систем, в которых проявляются синергетические эффекты. В системах, находящихся в термодинамическом равновесии, синергетические эффекты проявляться не могут.

После разъяснения применяемой специфической терминологии перейдем к рассмотрению данной проблемы, полагая, что имеем дело с нелинейными неравновесными стационарными системами различных иерархических уровней.

Говоря об энергетическом состоянии природных систем, мы должны отдавать себе отчет, что во всех случаях оперируем не абсолютными величинами, которые непознаваемы (принцип Дж. Максвелла), а лишь изменением энергии системы относительно какого-то исходного состояния или выбранной системы отсчета, конечно, при условии соблюдения закона сохранения энергии.

Согласно современным научным представлениям, материя существует как в виде реальных вещественных объектов, так и в виде полей. Это особенно важно для многих природных систем. Например, значительные по размерам и обладающие высокой плотностью массы горных пород создают вокруг себя гравитационную аномалию, электромагнитные и электрические поля и оказывают влияние на поведение молекул и пылевых частиц в аэрозолях, на поведение ионов в водных растворах в верхних частях земной коры и т. д.

Произвольное употребление термина "диссипативные структуры" приводит иногда к совершенно неверным выводам. И. Пригожий (1960), введя в обиход этот термин, прежде всего полагал, что диссипативные структуры - это открытые системы, в которых при удалении от равновесия возникают упорядоченные состояния. Для квалифицированного синергетическо-го анализа природных систем необходимо четко представлять себе физический смысл таких широко применяемых (часто произвольно) терминов, как "хаос", "детерминированный хаос", "диссипативные структуры", "динамический хаос"и др.

Начнем с понятия **хаос.** Наиболее четким примером хаоса могут служить хаотические движения молекул в газовой смеси вблизи состояния равновесия. По определению, это статистический, или "физический", хаос. В такой системе не возникают структуры, а движения молекул могут быть вызваны многими причинами. К подобным системам часто применяют термин "динамический хаос", хотя это не всегда оправданно, поскольку детерминированный хаос в особых условиях может быть средой, в которой могут проявиться более или менее неустойчивые упорядоченные структуры, когда малейшее изменение в системе приводит к их исчезновению или появлению новых структур. Иными словами, это динамически неустойчивые структуры. Но поскольку диссипативные процессы широко проявляются в макросистемах, то в них в зависимости от масштабов могут протекать различные явления.

В равновесной термодинамике господство представлений о стремлении систем к равновесному состоянию сыграло свою положительную роль при решении многих задач. Но при переходе к "большим" системам, которые отличались от микроскопических и достигали порой значительных размеров, начали господствовать представления о неравновесных стационарных системах, наиболее яркими примерами которых являлись открытые системы. Именно в открытых стационарных системах, обменивающихся с окружающей средой веществом, энергией и информацией, протекают различного рода процессы, но их параметры *(T, P, V* и т. д.) не изменяются на выбранном отрезке времени, хотя в самой такой системе, вернее, в разных ее частях, не остаются неизменными. Так, в теле человека *T* в разных частях меняется, но в целом равна какой-то определенной "стационарной" величине, например 36,6 °С.

Классическая термодинамика уже в XIX в. сформировалась как наука, в которой в простом каноническом виде все свелось к двум началам. Первое начало $-\delta Q = dU + \delta A$, второе - $dS = \delta Q / dT$, где δQ и δA - элементарные теплота и работа, dU - изменение внутренней энергии, dT - изменение температуры, dS - изменение энтропии. Следует заметить, что эти начала

появились главным образом на основе изучения тепловых машин, производящих работу, из чего следовали далеко идущие выводы о том, что в природе преобладают тенденции к рассеянию энергии и выравниванию температуры. Но исследователи из других областей наук, прежде всего биологи и геологи, сомневались в справедливости этих двух постулатов, ибо постоянно сталкивались с образованием из хаоса сложных, упорядоченных структур. На базе этих сомнений и родились неравновесная термодинамика и синергетика применительно к открытым природным системам.

Первое начало термодинамики, являясь по существу выражением закона сохранения энергии, не может быть применено в явном виде при анализе природных систем, ибо не указывает направления возможного протекания процессов. По сути дела, это констатация факта при передаче тепла конкретной системе, при этом допускается самопроизвольная передача тепла от тела, менее нагретого, к более нагретому, что нереально и лишено всякого физического смысла. Это противоречие устраняется вторым законом термодинамики.

Из всего разнообразия формулировок второго закона наиболее конкретна формулировка Клаузиуса: теплота самопроизвольно не может переходить от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой. Отсюда же вытекает, что невозможен такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты в работу вследствие охлаждения тела.

С точки зрения физики обратимые процессы - продукт абстрактного допущения, ибо все физические процессы необратимы. Но с точки зрения химии вблизи состояния химического равновесия, когда скорости прямых и обратных реакций равны, понятие об обратимости вполне приемлемо, хотя следует признать, что со временем и с изменением физико-химических условий и такие реакции становятся необратимыми.

Таким образом, если первый закон термодинамики дает представление об энергетическом балансе процесса (приход тепла и его расходование), то второй закон указывает на его возможное направление, которое можно выразить и через полную энтропию системы.

Исходя из термина Пригожина-Гленсдорфа о минимуме производства энтропии в открытых системах, в некоторых достаточно упрощенных моделях методами компьютерного моделирования, точно так же, как минимизируется свободная энергия (Карпов, 1981), можно, пользуясь имевшимися банками термодинамических данных, минимизировать и производство энтропии.

И действительно, $dS = dSi + dSe$, где dS - полное изменение энтропии к единице объема в системе, dSi - изменение энтропии за счет происходящих в системе внутренних необратимых процессов, а dSe - энтропия, привнесенная через границы системы из внешней среды. Напомним, что в стационарных системах $\Delta S = 0$, $\Delta S < 0$ и характеризует усложнение системы.

Термодинамический анализ природных систем однозначно указывает на то, что для их развития главную роль играет не энтропия, а свободная энергия, когда именно последняя $(\Delta G_{TP} = \Delta H - T\Delta S)$ определяет энергетический потенциал системы, а энтропия отражает лишь меру связанной энергии, которую нельзя превратить в работу.

Одно из весьма важных достижений Л. Берталанфи (1969) - это обоснование тезиса о "текущем равновесии", когда в открытых неравновесных системах как вблизи состояния равновесия (диссипативных), так и вдали от него отток энтропии во внешнюю среду уравновешивается производством энтропии в самой системе, и вывод многочисленных ученых о том, что вся биосфера находится в состоянии текущего равновесия, в своей основе верен. Феномен Солнца по отношению к биосфере заключается не только в том, что оно поставляет тепло, айв том, что за счет процессов в биосфере, например фотосинтеза, тепло преобразуется в химическую энергию, более "ценную" и менее энтропийную. А если учесть, что спектр электромагнитного излучения Солнца включает и тепловое излучение, то поглощение биосферой других электромагнитных излучений опять же приводит к химическим превращениям и снижению энтропии. В плане учета энтропийного баланса весьма интересно рассмотрение ситуации снижения T ниже 0 °С, образование льда и снега. Как известно, в ряду "пары воды - снег - иней -лед" энтропия существенно уменьшается. Иными словами, с наступлением холодов энтропия окружающей среды обитания

человека снижается, что сказывается на течении многих физиологических процессов в живых организмах, в том числе и у человека.

Поскольку потеря устойчивости открытой системой делает все более вероятной возможность случайного события, то, исходя из общеизвестного определения вероятности случайного события, когда таковой является предел, к которому стремится частота события при неограниченном увеличении числа испытаний, или $P(A) = \lim_{n \to \infty} \frac{m}{n}$, где m - показатель, когда случайное событие А происходит m раз в серии n независимых испытаний, $P(A)$ -вероятность (Ремизов и др., 2003), то нарастающая цепь случайных событий однозначно указывает на потерю устойчивости данной системы. Применительно к детерминированным или стохастическим природным процессам из этого простого на первый взгляд определения следует ряд интересных выводов:

-чем чаще происходит какое-либо природное событие, тем выше вероятность случайного события, которое по характеру и форме проявления будет отличаться от его аналогов;

-частота события является показателем энергетического потенциала системы, с которым это событие связано.

Одно из блестящих достижений учения И. А. Пригожина (1960) в термодинамике открытых неравновесных систем, где протекают необратимые термодинамические процессы, — это понятие внутреннего, или второго, времени. Суть этого понятия сводится к тому, что при монотонном линейном или нелинейном развитии (существовании) системы в ней по ряду причин возникают сравнительно кратковременные флуктуации - резкие отклонения от главной линии развития системы, ее пути (рис. 2.1). Поэтому в координатах "состояние - время" длительность существования флуктуации может быть неизмеримо мала по сравнению с временем существования системы. Поясним этот тезис на примере, отраженном на рис. 2.1. Возьмем в качестве примера открытую динамическую природную систему, которая движется по "термодинамической ветви развития", т. е. вполне детерминированному пути, когда, зная баланс масс системы и ее физико-химические параметры, мы в общих чертах можем предсказать ее состав и свойства на всем пути развития. На этом пути системы существуют в определенных границах, которые обусловливают их **стационарное** состояние. По мере изменения интенсивных параметров системы и ее свободной энергии она скачком (термин для природных систем кажется не слишком удачным, ибо скачок может длиться довольно продолжительное время) переходит в новое стационарное состояние. По сути весь путь от рождения до отмирания такой системы -это поступательный переход от одного состояния к другому. Например, зарождение, существование и отмирание магматического очага - это переход системы от одного стационарного состояния к другому на общей ветви линейного развития процесса. В этом случае **время** отражает длительность следующих друг за другом состояний, слагающих в итоге общее время существования данной системы. Применительно к природным системам это общее время может длиться сотни, тысячи, миллионы, десятки и даже сотни миллионов лет. Но в силу различных причин система может в сравнительно коротком временном интервале отклониться от термодинамического пути развития - произойдет флуктуация. При этом возникает качественно совсем другая система, по состоянию вещества и параметрам состояния отличающаяся от той матрицы, в которой она зарождалась. Ниже мы детально рассмотрим эти примеры, но суть явления заключается в том, что эта система, время существования которой неизмеримо меньше, чем всей мегасистемы в целом, начинает "жить" по своему внутреннему времени, включающему в себя время зарождения флуктуации, ее существование и отмирание. Следует заметить, что такие флуктуации могут возникать как в рамках стационарных состояний, так и за их пределами, особенно на отрезках перехо-

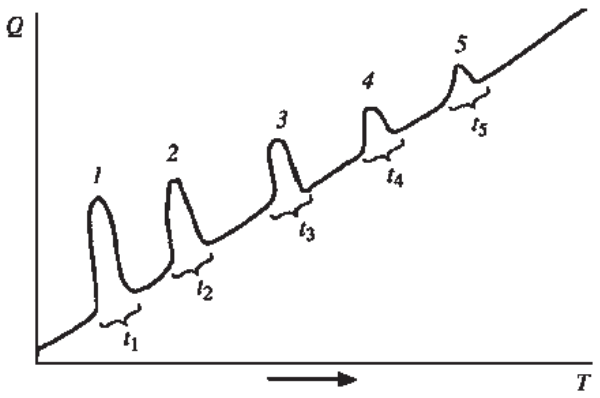


Рис. 2.1. Проявление флуктуаций (1-5) при эволюции линейной стационарной системы, Т - "большое" время эволюции системы; t_{1-5} - "малое" время существования флуктуаций; Q - энергетический потенциал системы.

да системы от одного состояния к другому. Замечательно то, что эти две системы времени существуют одновременно. При этом мегаси-стема поступательно и "медленно" движется по вектору развития и характеризуется своим Большим временем; значительно меньшая по размерам система в режиме флуктуации располагает значительно меньшим по величине внутренним временем, в котором все процессы протекают быстрее, и система консервируется и угасает, возвращаясь к исходному состоянию, за свое относительно короткое внутреннее время. В равной мере это относится и к биологическим системам. Действительно, поступательное эволюционное развитие любой биологической системы идет по пути, предначертанному всей предысторией системы, ее генетическим кодом, внешними условиями существования. Это линейный путь развития. Но в силу проявления флуктуации могут возникать сообщества организмов с иными свойствами, и внутреннее время их существования будет неизмеримо меньше Большого времени существования всей биологической системы. В значительной мере это относится к микробам и вирусам, когда каждая сравнительно кратковременная флуктуация есть не что иное, как вспышка новой эпидемии, вызванной новыми штаммами микроорганизмов.

Нелинейные природные системы более "живучи", ибо имеют больше степеней свободы по сравнению с их линейными аналогами. С этих позиций нарушение в работе какого-то органа человеческого организма - это флуктуация, когда весь организм может оставаться в прежнем стационарном состоянии или переходить в новое стационарное состояние. Естественная смерть человека есть не что иное, как исчерпание ресурсов человеческого организма для поддержания его в стационарном состоянии жизнедеятельности. Иными словами, человеческий организм в полной мере использует преимущества открытых систем, когда принцип минимума производства энтропии надолго сохраняет весь организм от распада и деградации, хотя отдельные его органы и могут терять свои функциональные свойства. Существование открытой стационарной системы, каковой является, в частности, человеческий организм, подтверждает основные принципы неравновесной термодинамики. Так, поступающие внутрь человека воздух, вода и продукты питания участвуют в химических реакциях, поддерживающих жизнедеятельность структурированных органов жизнедеятельности ($\Delta Si > 0$), а наружу выделяются главным образом тепло и продукты метаболизма.

Что особенно важно подчеркнуть в теореме И. Пригожина (1960) и что зачастую пропускается при ее формулировке, так это кинетический элемент теоремы, а именно: "В стационарном состоянии системы **скорость** производства энтропии вследствие необратимых процессов имеет минимальное значение при данных внешних условиях, препятствующих достижению системой равновесного состояния ($dSi/dt > 0$ и минимально)". Как видим, речь идет о скорости производства энтропии в единицу времени и стремлении системы к стационарному состоянию, в котором протекают химические реакции ($\Delta G_{тр} > 0$) и выделяется энергия, чтобы не дать системе перейти к равновесному состоянию, при котором $\Delta G_{тр} = 0$ и химические процессы, обусловливающие жизнедеятельность, прекращаются, наступает смерть. Следовательно, вся совокупность процессов, протекающих в организме, не дает ему выйти из стационарного состояния, но если система незначительно отклоняется от такого состояния, то направленность всей совокупности процессов в организме приводит к уменьшению $\Delta Si/dt$ и возврату системы к стационарному состоянию. Если же такая система не может вернуться в прежнее стационарное состояние, то она по термодинамической ветви развития (см. рис. 2.1) переходит сравнительно быстро в новое стационарное состояние. Учитывая сложность и многофункциональность человеческого организма, следует признать, что это "быстро" может растянуться на месяцы и годы в зависимости от энергетического состояния организма и в общем виде от его возраста.

Здоровый организм при изменении внешних условий безболезненно переходит в иное стационарное состояние, но, ввиду необратимости процессов, в полной мере вернуться в прежнее стационарное состояние не может, "стрела времени" неумолима (следует признать справедливость утверждения "молодость повторить нельзя"). Кратковременная адаптация организма к изменению внешних условий есть не что иное, как способность при химически заданном балансе массы человеческого тела и его энергетического потенциала переходить в иное стационарное состояние.

Следовательно, устойчивость любого биологического объекта, а тем более человека, определяется его способностью по мере изменения внешних параметров переходить из одного стационарного состояния в другое. В то же время, если организм обладает необходимым "энтропийным запасом прочности", то, исходя из принципа И. Пригожина для стационарных состояний о минимизации производства энтропии, незначительное изменение внешних параметров может кратковременно вывести всю систему из стационарного состояния, но за счет своих внутренних процессов система вновь вернется в квазиисходное стационарное состояние. Таким образом, мы приходим к весьма важному выводу: чем сложнее система, чем выше в ней вариантность процессов, направленных на уменьшение энтропии, тем выше вероятность сохранения ее в стационарном состоянии. Иными словами, переходя к рассуждению о человеческом организме, мы приходим к простому житейскому выводу: чем более тренирован человек на преодоление внешних воздействий, тем более вероятно его возвращение в стационарное состояние после кратковременного изменения внешних параметров среды.

В этом случае мультипликативность, многофункциональность человеческого организма в целом позволяет ему включать наиболее эффективные механизмы сохранения стационарного состояния. При этом кроме физико-химических процессов большую роль играют психофизические факторы, которые являются результатом работы коры головного мозга и важным элементом сохранения стационарного состояния всего организма при изменении внешних параметров.

Влияние внешней среды может иметь и сезонный характер. Например, приход зимы, снижение температуры и переход воды в иней, снег и лед снижают энтропию окружающей среды. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на течение всех процессов в организме живых существ. И хотя человек научился укрываться в теплых жилищах от холодной окружающей среды, реакция организма на такую ситуацию однозначна. Когда организм теряет способность сохраняться в стационарном состоянии при смене внешних параметров среды, включая электромагнитную составляющую, это требует перехода в новое стационарное состояние, что не всегда протекает гладко и сопровождается болезненными явлениями.

Г. Хакен (1980), вводя понятие об управляющих параметрах открытых стационарных систем, или "модах", по сути дела пришел к гениальной формулировке Ньютона: "Объяснять как можно большее число фактов как можно меньшим числом исходных положений", что отвечает и принципу бритвы Оккама: "Не умножай сущностей без надобностей".

Универсальность синергетического подхода к открытым системам породила терминологическую неразбериху, поскольку в разных науках одни и те же явления называют по-разному. Так, реакции и системы вдали от равновесия проявляют склонность к структурообразованию и протеканию самопроизвольных периодических реакций. Но в физике это автоволновые процессы, а в химии автокаталитические реакции, где продукты реакции стимулируют саму реакцию и увеличение их концентрации ускоряет саму реакцию. Для обоих случаев применяют и термин "автоволны", хотя в физике твердого тела и механике ему зачастую придается совсем другой смысл, чем в химии и физической химии. Иными словами, применение специфических терминов должно строго соотноситься с конкретной системой, ее состоянием.

Как известно, автоволны, которые возникают и функционируют в конденсированных средах (твердых телах, расплавах, растворах, высокоплотных флюидах и т. д.), могут проявиться только при соблюдении одного очень важного условия: среда, в которой распространяются автоволны, должна характеризоваться равномерно распределенной избыточной энергией, характерной для такой неравновесной системы. Именно высокий избыточный энергетический потенциал относительно близкого к равновесию состояния, когда вся система обладает таким свойством, является обязательным условием проявления пространственно-временных структур во всем объеме исследуемой системы, ибо дискретное чередование активизированных и неактивизированных участков не приведет к появлению автоволн. Только активность всего объема, который мы рассматриваем в качестве системы, может привести к кооперативному проявлению новых свойств.

Частое упоминание в научной литературе, посвященной синергетике, принципа Онзангера воспринимается как канон. Но при этом не оговаривается, что принцип Онзангера применим только для условий незначительного отклонения от равновесия и справед-

лив для линейных процессов; к нелинейным системам он неприменим.

Человек представляет собой четко синхронизированную колебательную систему. Даже в течение суток у него чередуются два максимума и два минимума активности и все физико-химические процессы в организме совершаются в автоколебательном режиме, когда в суточном цикле синхронно меняются состав крови, функции внутренних органов, восприимчивость к лекарствам и ядам и т. д.

Иерархическая сопоставимость систем в среде обитания человека в общем виде выглядит следующим образом.

Гиперсистемы. 1. Земля - самоорганизующаяся система, ядро и геосфера которой (включая гидросферу и атмосферу) образовались за счет дисси-пативных процессов. Для процессов самоорганизации различных структур Земли характерна строгая иерархическая соподчиненность, соответствующая энергетической мощности и массоемкости породивших эти системы потоков энергии и вещества. Ядро генерирует магнитное поле Земли, вся масса Земли создает гравитационное поле. 2. Ионосфера - также самоорганизующаяся система, функцию управляющего параметра выполняет Солнце (Рудина, Солоницина, 1979).

Взаимодействие этих двух гиперсистем порождает широкий спектр явлений, которые наиболее четко обнаруживаются в экстремальных ситуациях. Характерно, что после солнечных возмущений, когда корпускулярные потоки доходят до Земли, они одновременно вызывают возмущения в магнитном поле Земли и в ионосфере.

Метасистемы. По отношению к гиперсистемам занимают подчиненное положение и размещаются на следующей иерархической ступени, характеризуясь меньшей массой и энергоемкостью. К ним можно отнести в твердой Земле зоны, различающиеся по термодинамическим параметрам: земная и океаническая кора, астеносферные слои, верхняя и нижняя мантия, ядро Земли.

В околоземном пространстве это прежде всего полость между земной поверхностью и ионосферой, где концентрируются электромагнитные излучения антропогенного происхождения. Назовем ее радиосфера. Как уже указывалось, в XX в. в этом пространстве образовался своеобразный электромагнитный резонатор, мощность которого непрерывно нарастает.

Мезосистемы. Это системы следующего иерархического уровня. В природе они размещаются в пределах мегасистем и по сути являются их производными. Исключение составляют техногенные мезосистемы, и об этом будет сказано ниже. Главной отличительной чертой природных мезосистем является то, что они находятся в фиксированном агрегатном состоянии и функционируют в сравнительно узком термодинамическом режиме, определяемом параметрами состояния.

В твердой Земле это прежде всего зоны глубинных разломов, гравитационные, магнитные и электромагнитные аномалии, выступающие в роли диссипативных структур - генераторов электромагнитных волн и физических полей. Особую группу представляют техногенные мезосистемы. Это крупные мегаполисы и технополисы, большие атомные электростанции и гидростанции, сопоставимые по своим энергетическим параметрам с природными мезосистемами. Мезосистемы этого типа могут преимущественно генерировать электромагнитные волны, распространяющиеся возмущения в виде импульсов энергии, стоячие волны, синхронные автоколебания, квазистохастические волны и дискретные автономные источники импульсной активности.

В надземном пространстве это тайфуны, ураганы, циклоны, генерирующие широкий спектр электромагнитных и иных типов возмущений. В отличие от перечисленных выше мезосистем их можно отнести к системам периодического действия, хотя следует признать, что их энергетический потенциал может значительно превышать таковой для многих мезосистем в твердой Земле, не говоря уже о мега- и технополисах.

В ионосфере к мезосистемам следует отнести короткоживущие пространственно-временные структуры (суббури), генерирующие широкий спектр электромагнитных излучений.

Мультисистемы. Характеризуют наименьший по размерности, времени действия и энергетическому потенциалу элемент всей рассматриваемой гиперсистемы. Это могут быть низкоэнергетические стационарные системы или высокоэнергетические короткоживущие источники импульсной активности.

В живой природе это прежде всего человек и другие сопоставимые с ним в пределах порядка энергетических единиц биологические объекты. Все они генерируют слабые электрические и магнитные (электромагнитные) поля, кото-

рые откликаются на воздействие всех перечисленных выше полей. Во многом это пассивные резонансные системы со своими управляющими параметрами порядка - модами. Совсем иное положение занимают природные и техногенные мультисистемы. Это, как правило, системы непериодического действия, генерирующие инфраволны, низкочастотное излучение и другие электромагнитные колебания: линии электропередач, трансформаторы, электровозы, радиопередатчики, радарные системы, телевизионные передающие устройства и другие радиоэлектронные и радиотехнические станции. Это активные резонансные системы, воздействие которых на биологические объекты велико, поскольку, как правило, они соседствуют с человеком в мега- и технополисах.

Природные мультисистемы разнообразны и характеризуют короткоживущие образования: грозовые облачные массы, небольшие по размерам тектонические и минерализованные зоны, водопады, скопления торосящегося льда при ледоходе, узкие ущелья, которые при сильных ветрах генерируют инфраволны, и т. д.

Иными словами, энергетический потенциал генерирующих различные излучения систем определяет в итоге степень, длительность и характер воздействия на биологические объекты, в том числе на человека.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В последние 20 лет сформировалось и успешно развивается новое научное направление - синергетика. В работах по синергетике излагаются общие подходы к изучению универсальных свойств явлений самоорганизации в динамических неравновесных системах. Особое значение при этом придается исследованию коллективных, кооперативных эффектов в изучаемых системах. При таком подходе исключительное значение приобретает понимание эмерджентных эффектов, которые проявляются в эмерджентных свойствах, не присущих тому или иному отдельно взятому элементу вне данной системы. Иными словами, это результат взаимосогласованного сочетания параметров неравновесной системы при высокой степени синергетиче-ских связей между ее элементами, при столь же высоком уровне кооперативного взаимодействия всех элементов данной системы. Синергетический подход оказался весьма плодотворным при рассмотрении широкого спектра природных явлений. В настоящее время издательство "Springer-Verlag" выпустило более 50 монографий по данной проблеме: это работы по физике, математике, химии, биологии, социологии, медицине и т. д. В контексте этих исследований и опираясь на результаты, полученные учеными разных специальностей, мы предлагаем новое научное направление - **синергетика среды обитания человека.**

Человек представляет собой открытую динамическую неравновесную самоорганизующуюся систему, обменивающуюся веществом и энергией с окружающей средой. С точки зрения физики и электрохимии человек - это электролитическая батарея, состоящая на 70-75 % из электролита (кровь, лимфа, различные жидкости и т. д.) Человек в целом и его внутренние органы в отдельности генерируют электрические и электромагнитные поля, фиксируемые различными физическими методами (электрорадиограммы, энцефалограммы, томография и т. д.).

Вторая половина XX в. характеризуется многочисленными исследованиями по изучению воздействия физических полей различной природы на человека и другие биологические объекты. Зачастую эти исследования носили закрытый характер, и до сих пор многие из них недоступны научной общественности.

Все физические поля, в которых функционирует человек, по своей природе можно разделить на три группы.

1.Космические - генерируемые главным образом Солнцем и, возможно, другими космическими объектами. Сюда же можно отнести и поля ионосферного происхождения.

2.Геолого-геодинамические - генерируемые геологическими телами,самой Землей и ее ядром. Наряду с громадным материалом по изучению физических полей данного типа имеется немало работ по "исследованию" так называемых "геопатогенных зон", что в подавляющем большинстве случаев можно отнести к околонаучному шарлатанству.

3. Техногенные - генерируемые различными техническими объектами - источниками электромагнитных излучений различной природы: радио- и телевизионными передающими устройствами, электростанциями, линиями электропередач, токопроводящими системами, научным оборудованием и т. д.

Суть предлагаемой к изучению проблемы заключается в том, чтобы **изучить одновремен-**

ное кооперативное воздействие полей разной природы на человека - задача, которую не ставил никто в мире.

В задачу предстоящего исследования входит выяснение количественных параметров кооперативного взаимодействия полей, генерируемых различными источниками; динамики этих процессов; вероятности протекания явлений самоорганизации в ходе такого взаимодействия с формированием пространственно-временных структур, генерирующих собственные поля и излучения, и как итог - выявление степени воздействия этих полей на биологические объекты от клетки до человека.

Планета Земля является открытой неравновесной динамической гиперсистемой, а современное ее состояние определяется необратимым ходом ее самоорганизации в течение более 4,5 млрд лет геологического развития. За этот период произошло снижение общего энергетического потенциала планеты в целом, что находит отражение в уменьшении диссипации тепловой энергии во внешнюю среду и масштабов тепловыделения. Строение Земли - результат ее длительной общепланетарной самоорганизации, следствием которого стало наличие твердого и жидкого ядер, мантии, астеносферы, континентальной и океанической кор.

На базе гиперсистемы планеты Земля зарождались, функционировали и отмирали открытые неравновесные системы более низких иерархических уровней - мега- и мезосистемы, структуры низких иерархий объединялись в структуру высших (Летников, 1992).

Неравновесные системы могут длительно функционировать только в режиме прокачки через них энергии, иными словами, это открытые системы. Прекращение энергетического потока обрекает систему на переход в стадию консервации, когда длительность ее существования обусловливается ее энергетическим потенциалом за счет накопленной на предыдущем этапе энергии. В то же время принцип наследования генетических черт от всех предыдущих уровней развития во многих разделах геологической науки является определяющим.

В соответствии с теоремой И. Пригожина о минимуме производства энтропии в открытой стационарной системе при фиксированных внешних параметрах очевидна "выгодность" таких открытых систем с точки зрения энергетического баланса, поскольку режим поддержания системы в стационарном состоянии требует минимального потребления свободной энергии. Состояние таких систем может оцениваться в режиме тер-мостатирования или гомеостаза (Летников, 1992). Иными словами, открытая система, стремясь как можно дольше сохраниться в стационарном состоянии, сводит до минимума рассеяние свободной энергии, и в этом плане открытые неравновесные природные системы являются с точки зрения энергетики "энергосберегающими", в них степень консервации свободной энергии внутри системы весьма велика и по своим масштабам превосходит диссипацию тепловой энергии в окружающую среду. Поскольку произведение *XI* (сила на поток) отражает мощность процесса, то устойчивость системы определяется ее способностью компенсировать отклонение *X„* и *1„* от стационарного состояния, что, в свою очередь, определяется способностью системы к производству энтропии. В таких системах реализуется механизм авторегуляции в той мере, в какой система обладает запасом свободной энергии, который позволяет ей адекватно отреагировать на внешнее воздействие и не выйти из стационарного состояния.

В основе процессов самоорганизации в открытых неравновесных системах лежит энергетическое начало. Так, если энергетический потенциал не достигнет определенного порогового значения, то процессы самоорганизации не происходят, и только в том случае, если энергетический потенциал системы достаточен (за счет энергетического потока извне или за счет экзотермических реакций в самой системе), чтобы компенсировать ее потери во внешнюю среду, в ней будут проявляться процессы самоорганизации и образовываться пространственно-временные или временные структуры. Причем переход "хаос - структура" происходит скачком. И наоборот, слишком большое поступление энергии в систему, в которой протекают процессы самоорганизации, приведет к прекращению процессов структурирования системы и переходу к хаосу. По сути дела, в открытых неравновесных природных системах процессы самоорганизации представляют цепь неравновесных фазовых переходов различного иерархического класса, когда масштабы, формы и длительность процесса самоорганизации определяются энергетическим состоянием системы.

Свойства высокоэнергетических открытых нелинейных неравновесных систем зависят от их состояния. Наиболее общей чертой таких систем является нарушение в них принципа суперпозиции. Как известно, принцип суперпозиции заклю-

чается в том, что "аддитивность причин приводит к аддитивности следствий" (Гапонов-Грехов, Рабинович, 1984). Анализ далеких от состояния равновесия природных нелинейных систем однозначно указывает на то, что в них принцип суперпозиции не сохраняется. Неадекватность между силой воздействия и откликом в системе на это воздействие и является наиболее характерной чертой нелинейных систем. Нарушение принципа суперпозиции вводит нас в сферу неопределенности, когда путь, по которому пойдет система, или несколько альтернативных путей развития трудно предсказуемы. В этихусловиях даже незначительные флуктуации могут "сдетонировать" широкомасштабные явления.

Поскольку все природные процессы необратимы, то они в значительной мере характеризуются склонностью к структурированию - созиданию новых структурных ансамблей. Именно в природных средах поражает разнообразие форм структурирования на фоне необратимого развития природных процессов.

Если вслед за А. Пуанкаре (1983) считать, что случайность наиболее вероятна в неустойчивом состоянии, то из этого постулата вытекает ряд очень важных следствий.

1.Поскольку формирование всяких мегасистем можно рассматривать как благоприятное сочетание детерминированных случайностей, то становится понятным, почему такие системы формируются именно в неравновесных условиях с ярко выраженной нелинейностью (Пригожий, 1960).

2.По физико-химическим полям в однородных средах с равномерным распределением компонентов и слабо проявленными локальными аномалиями можно составить представление о линейных слабо неравновесных условиях всей системы в целом. В таких условиях контрастный распад системы мало вероятен.

Отличительной чертой линейных и нелинейных систем является именно роль случайностей в их развитии. Действительно, в линейной системе с диссипацией энергии, представляющей собой затухающую во времени систему, случайность может частично проявиться в повторяющихся регулярных колебаниях около какого-то усредненного состояния. В этой ситуации роль случайностей в режиме эволюции всей системы весьма мала, система термодинамически детерминирована. Совсем иная ситуация реальна в нелинейной системе, где не соблюдается принцип суперпозиции. Здесь случайность выступает уже в ранге параметра порядка (моды), который может кардинально изменить не только состояние системы, но и пути ее дальнейшего развития.

В итоге мы неизбежно приходим к выводу о вероятностном характере целого класса нелинейных природных систем, ибо их рождение, функционирование и отмирание являются функцией многих переменных, и прохождение полного цикла развития той или иной системы во многом зависит от цепочки случайностей, наиболее часто проявляющихся в режимах с нелинейным характером развития. Поэтому чем больше предпосылок для проявления случайностей, тем выше вероятность их реализации.

Линейность предопределяет жесткую детерминированность той или иной системы, где внешние динамические воздействия в итоге и определяют путь ее развития. Напротив, нелинейность предусматривает и отклик самой системы на внешнее воздействие, проявление новых механизмов за рамками жесткой детерминированности.

Один из тезисов синергетики - медленные моды управляют быстрыми -отражает иерархию мод в сложных неравновесных природных системах, при этом реализуется стремление открытых неравновесных систем к минимальной диссипации энергии, к реализации энергосберегающих механизмов. С осуществлением этой тенденции в природных процессах мы сталкиваемся на различных иерархических уровнях. Велика ценность вывода И. Пригожина (1960) и о том, что микроскопический хаос в виде диссипа-тивного, рассеивающего энергию процесса может приводить к макроскопической упорядоченности системы, формированию макроструктур; это фундаментальный вывод о роли диссипативных хаотических процессов микроскопического уровня в понимании процессов самоорганизации в открытых неравновесных динамических системах.

На настоящий момент ситуация такова. До стадии развития так называемой "техногенной цивилизации", а именно до начала XX в., на планете Земля наряду с глобальным геомагнитным полем существовали природные источники, аномальные по отношению к естественному фону в части генерации полей различной природы: геологические тела, прежде всего зоны глубинных разломов, ионосферные явления, связанные с деятель-

ностью Солнца, другие явления планетарного характера, - и человек в ходе эволюции приспособился к этим полям.

В начале XX в. всего за 90 лет ситуация кардинально изменилась. Развитие техногенной цивилизации и лавинное нарастание мощности электромагнитных систем передачи информации привели к тому, что между земной поверхностью и ионосферой сформировалось единое электромагнитное поле (резонатор), напряженность которого все время нарастает. Вблизи мощных, излучающих электромагнитную энергию устройств параметры поля увеличиваются еще на несколько порядков. В пределах мегаполисов и технополисов происходит возрастающая по мощности закачка в землю электрической энергии, которая может трансформироваться в различные виды низкочастотных колебаний. В итоге формируются системы, в которых си-нергетические кооперативные связи на уровне взаимодействия полей различной природы очевидны, но до сих пор не изучены.

Общеизвестный тезис "За все приходится платить" находит свое неопровержимое подтверждение в рассмотренной нами ситуации. Развитие электромагнитных средств передачи информации в конце XX в. привело к формированию в замкнутом пространстве Земля - ионосфера рукотворной электромагнитной глобальной системы, по мощности сопоставимой с геомагнитным полем Земли. Сформировалась еще одна конкурентная электромагнитная система. И если до XX в. человек развивался в геомагнитном поле Земли, то появление дополнительной электромагнитной системы, в которой рождается и функционирует новое поколение людей, может привести к качественным изменениям человека как вида. Новые качества его будут накапливаться постепенно, а переход в новое состояние произойдет скачком за сравнительно короткий промежуток времени. Судя по некоторым косвенным признакам, у детей этот процесс уже начался.

Стремление к комфорту привело к созданию мегаполисов с весьма высоким уровнем потребления электрической энергии. Как следствие - генерация полей различной природы и их кооперативное взаимодействие, губительное для человека.

ПОЛЯ ОКОЛОЗЕМНОГО И ПРИЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВ

Внешняя оболочка Земли, где происходят генерация электромагнитных и электрических полей и синергетические кооперативные эффекты, в том числе явления самоорганизации, включает в себя тропосферу, стратосферу и ионосферу, наиболее протяженную по вертикали. Напомним, что ионосфера расположена в интервале высот от ~ 50 до 300 км (рис. 2.2), но разряженная ионизированная ее часть простирается на 10—15 земных радиусов Земли, вплоть до границы магнитосферы с межпланетной средой. Температура в ионосфере изменяется от ~ 200 до 1000-2000 К, а концентрация нейтральных частиц в миллион раз: от ~ 10^{15} см$^{-3}$ в области *D* до ~ 10^{9} см$^{-3}$ в области *F*. Наибольшая концентрация ионов и электронов достигается в самом верху, в области F_2 на высоте ~ 300 км (Иванов-Холодный, Никольский, 1969).

Хотя ионосфера не является средой обитания человека и ее масса и энергетический потен циал по сравнению с литосферой и тропосфе-

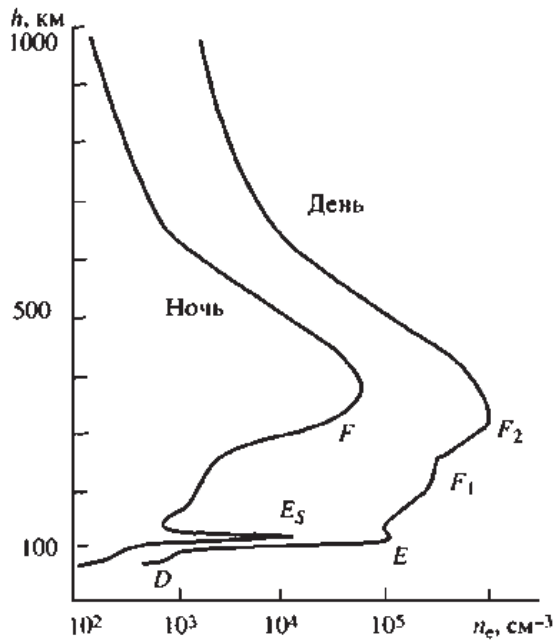


Рис. 2.2. Типичное вертикальное распределение электронной концентрации в ионосфере для дневных и ночных условий. На кривых буквами отмечено положение различных областей ионосферы (Иванов-Холодный, Никольский, 1989).

рой сравнительно малы, тем не менее ее роль в вертикальном и латеральном перетоках энергии, генерации магнитных и электромагнитных полей, возникновении резонансных и самоорганизующихся структур исключительно велика. Для ионосферы характерно крайне неустойчивое неравновесное состояние, что дает основание рассматривать ее в целом (если такое рассмотрение достаточно корректно) как метаста-бильную систему. Уникальной особенностью ионосферы является то, что она одновременно испытывает как интенсивное воздействие извне, со стороны Солнца и околоземного космического пространства, так и со стороны поверхности Земли за счет достаточно мощных явлений природного (землетрясения, ураганы, мощные грозовые фронты, извержения вулканов и т. д.) и техногенного (подземные и наземные ядерные и другие мощные взрывы, электромагнитное зондирование, электромагнитные излучения и т. д.) характера.

Ионосфера, как сказано выше, - сложная самоорганизующаяся система, функционирующая в колебательном режиме, с характерным пространственно-временным распределением электромагнитной концентрации по высоте, по широтам (экваториальная, среднеширотная и высокоширотная ионосфера), с наличием коррелятивных связей ионосферных параметров с солнечными и ионосферными на разных высотах для ночных и дневных условий. Все это протекает на фоне динамических процессов *в* самой ионосфере и долгопериодических колебаний более высокого порядка и осложнено многими факторами.

Наиболее характерен суточный колебательный ритм в режиме ночь-день. Характерны также сезонное и 27-дневное распределение возмущений ионосферы с характерной циклической повторяемостью их (Рудина, Солоницина, 1979). В ионосфере возникают и функционируют короткоживущие пространственно-временные структуры (суббури), генерирующие широкий спектр электромагнитных излучений.

По теории одним из элементов самоорганизации является наличие колебательных или периодических явлений, которые могут фиксироваться в качестве временных вариаций. Солнечно-суточные вариации происходят в течение суток и достигают максимума в период летнего солнцестояния, а минимума - в период зимнего солнцестояния. Они также зависят от солнечной активности. Источником магнитного поля солнечно-суточных вариаций являются вихревые замкнутые токовые системы, расположенные в слое *E* ионосферы (100-120 км от поверхности Земли), внутри которых вращается земной шар (Дубров, 1974).

Область между поверхностью Земли и ионосферой (тропосфера и стратосфера) изучена значительно лучше, процессы массопереноса и формирования глобальных структур здесь зачастую прогнозируются с достаточно высоким совпадением с реальностью. Особый интерес представляет взаимодействие между тропосферой и стратосферой в контексте их влияния на приземный слой, особенно в плане воздействия на среду обитания человека.

Высокая степень ионизации ионосферы и гетерогенность в ее строении обусловливают нелинейность проявления в ней различных физических, химических и фотохимических процессов, когда в целом ионосфера является открытой нелинейной динамической системой. Энергетический потенциал ионосферы поддерживается в основном за счет ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, на что накладываются 11-летние и 27-дневные вариации Солнца, а также возмущения во время солнечных вспышек при регулярных суточных изменениях ионосферы (см. рис. 2.2). Кроме того, являясь частью верхней атмосферы, ионосфера реагирует и на изменение параметров состояния нейтральной атмосферы (Иванов-Холодный, Никольский, 1969). Вместе с тем мощное экспоненциальное развитие радио, телевидения, радиолокации, пуски ракет, ядерные и другие мощные взрывы воздействуют на ионосферу снизу, нарушают ее стационарность, что приводит к нелинейным эффектам, предсказать которые в настоящее время не представляется возможным.

Способность ионосферы быстро передавать электромагнитные импульсы на большие расстояния, с одной стороны, создает условия для выравнивания электромагнитных полей в ионосфере, но с другой, неравновесность и нелинейность этой системы способствуют локализации электромагнитной энергии в виде пространственно-временных структур ионосферы. Из электромагнитных излучений, идущих от Солнца и космического пространства, до поверхности Земли помимо волн оптического диапазона (диапазон видимого света) 290-1000 нм и близких к ним инфракрасного и ультрафиолетового излучений доходят низкочастотное - до 5 Гц и радиочастотное - с длиной волны 0,8-30 м. Электрические поля фиксируются в атмосфере Земли, особенно часто вблизи ее поверхности, когда в среднем напряженность электростати-

ческого поля у поверхности Земли ~ 100 В/м, а магнитного поля Солнца ~ 50 Гс, геомагнитное поле Земли 0,5 Гс, но суточный максимум напряженности достигается на всей Земле в одно и то же время - в 19 ч по Лондонскому времени (Горбачев, 2003). Центры циклонов кроме мощных потоков инфраволн излучают ЭМВ с частотой 2 Гц.

Вспышки на Солнце приводят к нарушению электромагнитного поля геомагнитных пульсаций (~ 50-60 В/м), что близко по величине к усредненным значениям естественного атмосферного электрического поля с частотой пульсаций 0,005-5 Гц и к частотам биологических объектов, в частности человека. Поэтому недомогания людей при геомагнитных и связанных с ними электрических пульсациях имеют резонансную природу, а если на них накладываются еще и инфраволновые воздействия, то эффект усиливается многократно. Судя по данным В.В. Адушкина и А.А. Спивака (1995), ин-фразвуковые возмущения с частотой 6-8 Гц оказывают в высшей степени негативное влияние на эмоциональное и психическое состояние человека. Особенно опасен инфразвук с амплитудой 6,3 Па.

В. Шуман (1955) теоретически предсказал, что на ультранизких частотах (УНЧ) в диапазоне 10,6-41,1 Гц должно наблюдаться резонансное усиление поля атмосферных помех в волноводе Земля - ионосфера. Он сделал свои расчеты для идеально проводящего резонатора. Дальнейшие инструментальные исследования (Wait, 1965) в общих чертах подтвердили наличие этого эффекта с типичными вариациями местного значения с фиксацией шести резонансных частот. Усредненные данные спектров частот позволили выделить четкие максимумы спектра на частотах 7,8; 14,1; 20,3; 26,4; 32,5 Гц, причем установлено, что эффект резонанса убывает с частотой и усиление поля наблюдается только на ультранизких частотах (Альперт и др., 1967).

Внешние электромагнитные излучения по-разному взаимодействуют с внешними оболочками Земли. Потоки солнечной плазмы наиболее активно вступают во взаимодействие с Землей на границе ее магнитосферы, а электромагнитное излучение Солнца эффективно взаимодействует с Землей в верхней атмосфере (Адушкин, Спивак, 1995).

В изучении связей между солнечно-магнитосферными возмущениями и атмосферно-электрическими явлениями А.Н. Ярошенко (1987) в качестве полигона выбрал высокоширотную зону, где из-за большей проводимости атмосферы плотность тока в системе "атмосфера - Земля" значительно выше, чем в средних и низких широтах. Им было установлено, что атмосферное электричество высокоширотной зоны является средой, через которую солнечно-ионосферные возмущения наиболее интенсивно воздействуют на глобальную атмосферно-электрическую цепь. Одним из важных выводов этой работы является экспериментальное обнаружение пространственно временных структур атмосферного электрического поля в высокоширотной зоне и определение параметров их существования в зависимости от уровня магнитовозмущенности ионосферы. Установлено, что в условиях магнитного возмущения в атмосферном электрическом поле появляются неоднородности размером более 150 км и временем существования 0,5-1 ч. По сути эти структуры отражают уровни самоорганизации в глобальном электрическом поле атмосферы, когда энергетическим источником их возникновения и существования служат магнитосферные возмущения. Таким образом, однозначно доказана возможность существования пространственно-временных структур атмосферного электрического поля, которые, в свою очередь, могут активно взаимодействовать как с теллурическими, так и с техногенными полями.

О сложности процессов, протекающих в ионосфере, можно судить хотя бы по тому факту, что в момент солнечных вспышек отмечалось возрастание ионизации, которое не сопровождалось возникновением токов в ионосфере (магнитное поле оставалось спокойным), и только через 1,5 сут внезапно разразилась магнитная буря (Hultgvist, 1959). Подобные факты указывают на высокую степень инерционности в состоянии ионосферы и на высокую вероятность проявления процессов самоорганизации с внезапным переходом от стационарного состояния в стадию бифуркаций.

Дополнительно следует отметить особую значимость градиента потенциала электрического поля как характеристики загрязненности воздуха. Эта проблема заслуживает особого внимания, так как при высокой степени загрязненности воздуха в мегаполисах столь же высока вероятность образования смога. Смог выступает как концентратор электрических зарядов на поверхности взвешенных частиц; в еще большей степени это свойство проявляется в случае, когда на базе смога образуется туман. Независимо от вре-

мени года на поверхности кристалликов льда или влаги накапливается электрический заряд. Если на туман воздействует мощное электромагнитное излучение, суммарный потенциал электрического поля возрастает. Иными словами, туман на базе смога становится концентратором электрической энергии, и в условиях близости к источникам мощных электромагнитных излучений (телевизионные, радиолокационные, радиопередающие станции) в тумане могут по механизму самоорганизации возникать автономные структуры, образующие собственные поля и генерирующие различные виды электромагнитных волн и физических полей. Эти структуры могут функционировать и в режиме синхронных автоколебаний, квазистохастических волн или импульсов электромагнитной энергии.

Особое значение для анализа сложных многофункциональных электромагнитных систем в околоземном пространстве имеют лаборатории геоэлектрического мониторинга, расположенные на значительном удалении от источников индустриальных помех. К их числу относится Геофизическая обсерватория "Борок" при Институте физики Земли РАН. Результаты, полученные в условиях "электромагнитного заповедника", отличаются высокой корректностью и многоплановостью, выполняются в непрерывном обсерваторском режиме (Анисимов, Дмитриев, 1996). С точки зрения синергетики эти исследования интересны в плане установления обратных связей между электрическими полями атмосферы, входящими в ее единое электрическое поле, и другими электромагнитными динамическими системами различной природы. Наибольший интерес представляют естественные электрические и электромагнитные поля именно в приземном слое, где и протекают процессы жизнедеятельности. Установлено, что максимальные значения напряженности электрического поля и плотности объемного заряда фиксируются именно в приземном слое в первых метрах и десятках метров, затем они снижаются до минимальных значений уже на высоте 1-3 км (Дмитриев, Анисимов, 1994). Многочисленными исследованиями доказано проникновение квазистационарных электрических полей из ионосферы и земной поверхности и от земных источников в ионосферу. Опять же с позиций синергетики особенно важным является инструментальное установление наличия пространственно-временных структур в реальной атмосфере в их связи с нестационарными локальными, региональными и глобальными полями (Дмитриев, Анисимов, 1994). На основании полученных инструментальных данных авторами построена нестационарная одномерная модель электрического поля и тока, что позволяет оценить в первом приближении влияние региональных вариаций проводимости тропосферы на среднюю атмосферу и ионосферу, а также антропогенные воздействия на земное электрическое окружение. Особенно ценным в указанной работе является вывод об определяющей роли проводимости в приземном слое высотой 1 км и ее влиянии на установление высотного профиля электрического тока вплоть до высоты 20 км. Иными словами, в установлении электромагнитного переноса от любых источников ЭМИ - естественных или техногенных - в верхнюю атмосферу, тропосферу и ионосферу (и обратно) большое значение приобретает именно проводимость приземного слоя - это десятки и сотни метров, до 1 км. Таким образом, мы приходим к весьма важному выводу, что состояние приземного воздушного слоя является определяющим в реализации вертикального переноса электрического тока. Это означает, что в условиях высокого насыщения аэрозолями (смог) или техногенными электрическими или электромагнитными излучениями в пределах мега- и технополисов резко возрастает возможность вертикального переноса электрического тока; отсюда и роль глубинных разломов, генерирующих электрические и электромагнитные излучения. При высокой концентрации аэрозолей в составе смога, пронизываемого направленными и стохастическими электрическими и электромагнитными полями, могут возникнуть площадные зоны вертикального перетока ЭМИ, что несомненно отрицательно скажется на состоянии людей, особенно метеопатов и больных с нарушениями сердечно-сосудистой системы. Именно сочетание смога и высокой насыщенности приземного слоя (до 1 км) электромагнитными излучениями создает крайне неблагоприятную обстановку для нормального функционирования человеческого организма. Этот эффект усиливается при высоком звуковом насыщении воздушной среды в приземном слое. В такой ситуации достаточно сильный ветер (если он не порождает инфраволны) будет благоприятным фактором для снижения негативного синергетического воздействия на среду обитания человека.

Эффект негативного воздействия на человека проявляется при сильных короткопериодических пульсациях электрического поля в диапазоне частот от 10~^{3} до 1 Гц, измеряемых на высоте 1,5 м над землей в условиях хорошей погоды. При этом присутствуют возмущения электрического поля с масштабом ~ 60 м, вызываемые, возможно, конвективными ячейками (Anisimov et al., 1994). Иными словами, мы снова получаем экспериментальное подтверждение структурированности электрического поля в приземном слое, что говорит о высокой степени его самоорганизации. Пульсации более высокого порядка, регистрируемые на земной поверхности, судя по многочисленным наблюдениям, возникают в магнитосфере Земли и имеют внутримагнитосферное происхождение (Большакова, Боровкова, 1996).

Следовательно, начиная от верхних слоев магнитосферы и до приземного слоя инструментальными методами установлены явления самоорганизации электрических и электромагнитных полей, что свойственно всем открытым динамическим системам. В то же время все эти пространственно-временные структуры обладают способностью генерировать автономные излучающие поля, что дает основание для постановки задачи исследования энергетического потенциала таких систем и частотных характеристик генерируемых ими полей в плане воздействия на человеческий организм.

Все перечисленные события занимают нижние уровни в иерархии механизмов возмущения в околоземном пространстве. Наиболее высокий энергетический потенциал и глобальное воздействие общепланетарного характера имеют мощные протонные вспышки на Солнце, которые проявляются на поверхности Земли в виде геомагнитных бурь. И в этих случаях обнаруживаются пульсации, имеющие разную природу, при достаточно широком диапазоне их проявления: от 10~^{3} до 3-5 Гц (Куражковская, Клайн, 1995).

Следовательно, во всем околоземном пространстве в иерархии соподчиненных систем с характерной обратной связью в определенных ситуациях возникают, функционируют и отмирают пространственно-временные структуры с колебательным режимом развития, о чем говорят связанные с их существованием пульсации. Набор этих пульсаций и слагает весь спектр негативных электромагнитных воздействий на человека, ибо при монотонном характере электромагнитных излучений человеческий организм не испытывал бы столь болезненных воздействий.

Напомним, что тропосфера характеризуется падением *T* с высотой и низким содержанием озона, естественных радионуклидов и ионизированных частиц, и наоборот, стратосфере свойственны неизменная или растущая с высотой *T* и значительно повышенное содержание перечисленных выше компонентов. Несомненно, что это неравновесные открытые динамические гиперсистемы с различными параметрами существования. Между ними проходит граница, именуемая тропопаузой. Как следует из данных Н.П. Шакиной и И.Н. Кузнецовой (1997), для тропопаузы весьма характерно мегамасштаб-ное структурирование, указывающее на глобальное проявление самоорганизации в этом слое, разделяющем две неравновесные системы. Здесь устанавливаются "купола" с типичными размерами порядка тысяч километров и характерные складки и воронки, направленные в сторону поверхности Земли и фиксирующие пути вторжения воздуха из стратосферы в нижнюю тропосферу вплоть до земной поверхности. При этом, судя по данным Росгидромета, у земной поверхности происходит резкое повышение суммарной бета-активности (СБА) радионуклидов и плотности их выпадения.

В 1995 г. на территории России было отмечено более 120 случаев резкого возрастания радиоактивности в приземном слое воздуха с превышением фоновых концентраций более чем в 5 раз и фоновой плотности выпадений в 10 раз и более. В начале марта 1996 г. в Новосибирске, Барнауле и Красноярске был отмечен резкий всплеск суммарной бета-активности до 100-300-10~^{5} Бк/м^{3}, что соответствует превышению фона в 5-20 раз. Судя по данным радиозондирования, над этой территорией происходило опускание тропопаузы до 467 ГПа. Обнаруженные в высоких пробах 3 марта 1996 г. изотопы Be-7 в концентрациях 389-10~^{5} и 891 10^ Бк/м^{3} указывают на региональное вторжение стратосферного воздуха в нижние слои атмосферы (Ша-кина, Кузнецова, 1997). Авторы подчеркивают неординарность описанного феномена, когда ось стратосферных выпадений пришлась на полосу от Барнаула до Красноярска и была связана с максимальным опусканием динамической

тропопаузы почти до 4 км в среднюю тропосферу.

Описанные Н.П. Шакиной и И.Я. Кузнецовой явления заслуживают особого внимания, ибо, вне всякого сомнения, разрыв тропопаузы и обвальное поступление к поверхности Земли на больших пространствах масс с высоким содержанием радионуклидов и озона должны сопровождаться и возмущениями электромагнитного характера. Прорыв к поверхности Земли воздушных масс с высоким энергетическим потенциалом слагающих их частиц, столь характерных для стратосферы, должен повлечь за собой деформацию магнитного и электромагнитного регионального поля, не говоря уже о том, что это явление не может усилить взаимодействие Земли и техногенных электромагнитных полей с ионосферой. С сожалением приходится констатировать, что исследования в этой области не проводились, как и то, что такая проблема до сих пор никем не ставилась.

Из приведенного обзора видно, что внешние оболочки Земли характеризуются отчетливо выраженными синергетическими чертами развития и склонностью к явлениям самоорганизации, выражающимися в формировании пространственно-временных структур, время существования которых зависит от энергетического потенциала той среды, в которой они возникают.

ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И ПОЛЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ СТРУКТУРАМИ ЛИТОСФЕРЫ

В целом, как мы уже говорили, Земля является самоорганизующейся системой, геосферы которой образовались за счет диссипативных процессов (Летников, 1992). Колебательный режим многих параметров состояния и особенно четко проявленная периодичность указывают на высокую мобильность таких систем и их не очень высокую устойчивость по отношению к изменению внешних параметров. Одним из уникальных природных феноменов является геомагнитное поле (ГМП) Земли.

Геомагнитное поле Земли слагается из двух компонент - внутренней и внешней. Внутренняя обусловлена строением Земли как космического тела (токовые системы на границе ядра и др.), она определяет медленные, вековые колебания постоянного поля Земли, внешняя - влияние ионосферы и электрических полей, связанных с ней. Электромагнитные системы в окружающем Землю космическом пространстве как раз и вызывают быстрые изменения ГМП и в значительной мере обусловливают его переменную часть, называемую вариациями ГМП. Невозмущенные вариации ГМП: 1) солнечно-суточные, период которых равен солнечным суткам; 2) лунно-суточные, период которых равен лунным суткам; 3) годовые вариации.

Непериодические вариации ГМП связаны преимущественно с резкими возмущениями геомагнитного поля, обусловленными главным образом магнитными бурями, зависящими от солнечной активности.

Геомагнитное поле Земли является средой обитания всех живых организмов. Человек с его развитым многофункциональным мозгом и тонкой организацией высшей нервной деятельности наиболее чутко реагирует на возмущения ГМП, особенно если эти возмущения осложняются воздействиями других полей, особенно техногенных.

С точки зрения синергетики естественное геомагнитное поле с момента возникновения клетки явилось тем информационно-энергетическим стационарным полем, в котором и происходили процессы жизнедеятельности; недаром, по данным палеонтологов, явления инверсии магнитных полюсов приводили к катастрофическому вымиранию многих видов еще и потому, что ГМП было носителем информации об окружающем пространстве. Это качество потеряно человеком, но хорошо выражено у микроорганизмов, растений, птиц, рыб, обитателей морей и океанов и т. д. Таким образом, именно ГМП, как и кислородная атмосфера Земли, является средой обитания человека, и длительное экранирование последнего от воздействия ГМП приводит к негативным, иногда необратимым, последствиям. В этом плане человек как особь, у которой процессы саморегуляции, сохранения гомео-стаза в различных стационарных системах опираются не только на физико-химическую составляющую в его организме, но и на развитую систему высшей нервной деятельности, обладает большим числом степеней свободы, более гибким приспособлением к изменению среды обитания, в том числе и ГМП, хотя именно изменения естественного геомагнитного поля переносятся им особенно болезненно.

Стационарное воздействие значительных по размерам геофизических аномалий, обусловленных геологическими телами, также оказывает влияние на ГМП и на процессы жизнедеятельности. Для этих аномалий характерно резкое изменение градиентов составляющих элементов ГМП - нескольких сотен или тысяч гамм на километр. В пределах Курской магнитной аномалии величина вертикальной составляющей ГМП в несколько раз превышает таковую нормального поля. По данным И.В. Дардымова (1966), заболеваемость населения в этом районе гипертонией, ревматизмом и нервно-психическими болезнями на 120-160 % выше, чем в районах с нормальным ГМП.

Геофизики разделяют ГМП по степени изменяемости на постоянное (основное) и переменное. Постоянное поле характеризуется отсутствием вариаций с периодом до года, хотя следует оговориться, что и в этом случае оно подвержено вековым колебаниям. Период изменения постоянного поля Земли составляет от нескольких сот до тысячи лет. Наоборот, переменное магнитное поле Земли характеризуется различными периодами - от долей секунды до месяцев. Величина переменного поля, наблюдаемая на поверхности Земли, не превышает ~ 2 % величины постоянного поля, но его биологическая значимость несомненна (Дубров, 1974). Силовые линии земного магнитного поля выходят приблизительно из центра Земли через южное полушарие (т. е. в южном полушарии находится северный геомагнитный полюс, а в северном - южный), а затем, обогнув Землю, вновь направляются к центру через северное полушарие.

А.П. Дубров (1974) одним из первых обратил внимание на роль геомагнитных пульсаций в процессах жизнедеятельности. Геомагнитные пульсации - электромагнитные волны очень низкой частоты, отмечаемые на поверхности Земли, их еще называют короткопериодные колебания (КПК). Считается, что они возникают за счет взаимодействия плазмы гидромагнитных волн, идущих от Солнца, с магнитосферой Земли, а разделяются на два класса - регулярные *(P_c)* и нерегулярные *(P_c-)*. Для регулярных колебаний характерны периоды от 0,2 до 600 с. Нерегулярные делятся на две группы с периодами 1-40 и 40-150 с. В течение суток длительность КПК изменяется от минут до нескольких часов, а амплитуда - от десятых долей гаммы до десятков гамм. Установлено, что в отдельных случаях вертикальная составляющая электрического поля КПК достигает величин порядка долей и даже десятков вольт на метр (Чернышев, 1972).

Иными словами, ГМП по многим параметрам является колебательной системой, в которой в ряде случаев отмечается ярко выраженная периодичность. Набор таких признаков указывает на высокую неравновесность системы в целом, осложненной флуктуациями более низких порядков.

Наличие зон глубинных разломов является одной из характерных черт литосферы. В активный период своего существования зоны глубинных разломов служат активными флюидопроводниками и в зависимости от глубины проникновения в литосферу характеризуются различным составом флюидов, которые по сути дела представляют собой высокотемпературный электролит. Между нижними уровнями проникновения разломов в литосферу и поверхностью Земли существуют градиенты *T* (до 1000 °С) и *P* (до 46-50 кбар), которые и являются движущей силой переноса флюидов по вектору *P* и Г (рис. 2.3). Поскольку зоны глубинных разломов возникают под действием тектонических сил, то в области пластических деформаций, осложненных химическими реакциями, схема энергетических переходов такова: работа —> теплота —> коротковолновое излучение. В области хрупких деформа-

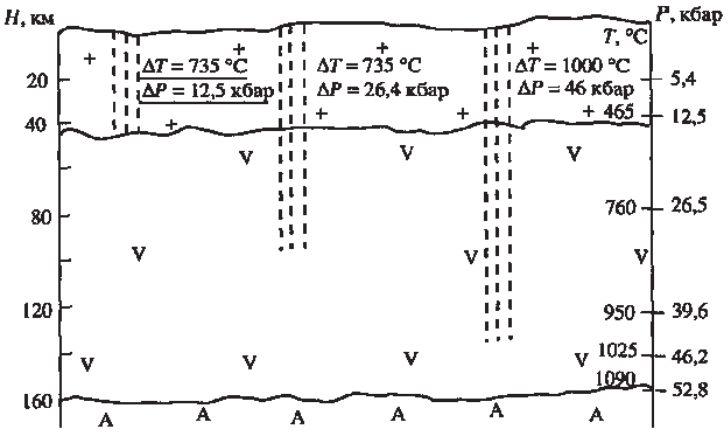


Рис. 2.3. Типизация зон глубинных разломов на глубине заложения. А — астеносфера; V - мантийная литосфера + земная кора, пунктиром обозначены зоны глубинных разломов.

ций, где широко проявлены трещинообразование и дробление пород, выделяется значительная электрическая энергия, которая обусловливает газовые разряды, возрастание поверхностной проводимости и эмиссию электронов.

В результате многолетнего изучения зон глубинных разломов, проникающих в недра Земли на десятки и первые сотни километров, установлено, что некоторые из них являются генераторами потоков ионизированных частиц и низкочастотного электромагнитного излучения. Поскольку такие разломы формируются при высоких *T* и *P*, то при явлениях дифференциации вещества слагающие их породы приобретают тонкополосчатую структуру чередования токопроводящих слойков, сложенных минералами Fe-Ti-Mg-Mn, и слойков диэлектриков, сложенных минералами Si-Al-K-Na. В итоге в земной коре возникают гигантские по размерам флюидизированные конденсаторы шириной от нескольких до 10-15 км и протяженностью до нескольких сот километров. Все такие разломы разделяются на пассивные (в которых глубинный перенос флюидов прекратился), активные и структуры периодического действия. Над разломами фиксируются проникающие высоко в атмосферу потоки ионизированных частиц, электромагнитные низкочастотные излучения, газовые эманации и инфраволны. Мощность этих линейных полей бывает настолько велика, что в относительно спокойном атмосферном режиме они экранируют прохождение кучевых облаков и над ними происходит размывание покрова сплошных облачных масс (Памир, Тянь-Шань, Восточная Сибирь, Казахстан), хорошо наблюдаемое на космических снимках. Имеются факты, когда подобные надразломные системы экранировали прохождение обратного сигнала локаторных станций (Алтай) (рис. 2.4). Иными словами, это зоны интенсивного энергопереноса по вектору градиентов из глубин планеты к ее поверхности, когда в определенных ситуациях (низкая турбулентность атмосферы) суммарный энергоперенос продолжается над зоной разлома и в атмосфере. Возможно, что в случаях повышения солнечной активности и значительного роста энергетического потенциала ионосферы происходят "короткие замыкания" между полем, генерируемым зоной разлома, и ионосферой.

В плане выявления связей геологических и ионосферных полей следует выделить работы А.Н. Дмитриева (1987). На обширных площадях азиатской части России с 21 по 23 октября 1981 г. сетью метеостанций, геофизических и астрономических пунктов и отдельными наблюдениями было зафиксировано свечение неба, которое описывалось как "полярное сияние". А.Н. Дмитриевым после обработки большого статистического материала было установлено, что в распределении сияний основное участие принимали крупные разломы. Атмосферные сияния по времени совпали с сильнейшими возмущениями магнитного поля, максимальная "буря" октября 1981 г. приходится на дни регионально регистрированного свечения неба. При этом наибольшие возмущения отмечались северными станциями. Максимальные сияния во всем временном интервале геомагнитного возмущения оказались приуроченными к геологическим структурам Горного Алтая, где в качестве наиболее ярко выраженного феномена выступала осевая часть Теректинского хребта, над которым на протяжении около 300 км многочисленные наблюдатели отмечали наиболее яркое свечение (Дмитриев, 1987). Поскольку излучения световой и электромагнитной энергии над разломами были вызваны космическими причинами, А.Н. Дмитриев справедливо назвал их "терра-космическими".

Большой вклад в изучение ионосферно-земных связей был сделан в ходе дальнейших исследований на алтайском полигоне. А.В. Шитов (1999), проводя исследования, установил, что природные самосветящиеся образования (ПСО) являются результатом процессов в литосфере и указывают на возможность вертикальных энерго- и массоперетоков от поверхности Земли; решающая роль в реализации этого механизма принадлежит зонам активных разломов. Был обнаружен особый тип локальных геомагнитных аномалий в местах активизации ПСО, установлены аномальные характеристики геофизических полей, что непосредственно влияет на электромагнитную связь и радиотехнические и навигационные системы авиации. Выявлено отрицательное влияние ПСО на здоровье человека. На основании сопоставления многочисленных факторов был сделан вывод о трансформации упругих напряжений в земной коре в электромагнитное переизлу-

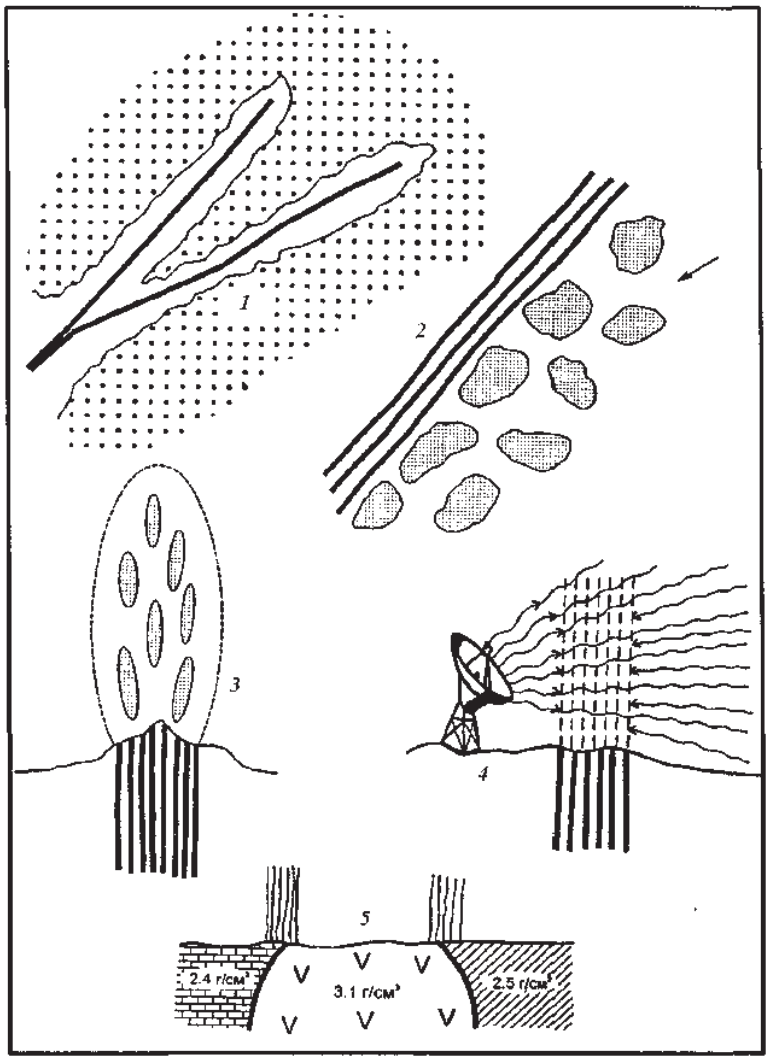


Рис. 2.4. Наиболее типичные ситуации проявления аномальных свойств геологическими структурами Земли: 1- размывание облачности над зонами глубинных разломов; 2 - экранирование глубинным разломом прохождения кучевых облаков (стрелкой показано направление ветра); 3 - светящиеся образования над зоной глубинного разлома; 4 - экранирование обратного сигнала радиолокационной станции над зоной глубинного разлома; 5 - резкоградиентные зоны на контактах разнородных геологических тел.

чение. Многолетние наблюдения позволили сделать вывод о связи ПСО с перепадами максимальной активности Солнца (Дмитриев, Шитов, 1998), когда возникают перетоки электромагнитного излучения от разломов по направлению к ионосфере.

Существенный вертикальный перенос энергии от поверхности Земли к ионосфере подтверждается в работах Л.И. Морозовой (1993, 1997), которая на основании спутникового мониторинга установила роль глубинных протяженных разломов в формировании линейных облачных аномалий и, наоборот, размывание облачности над разломами при региональном развитии облачности.

Относительно распространения электромагнитных волн низкой и сверхнизкой частоты, источник которых расположен внутри волновода, образованного Землей и ионосферой, следует учитывать геологическое строение приповерхностного слоя, особенности строения земной поверхности, поскольку это может приводить к канализации волн или их резонансному переизлучению, т. е. локальным эффектам усиления поля или явлениям другого типа, которые обычно упускаются при нивелировании поверхности Земли, что придает ей однородный геометрический и электрический характер (Wait, 1965; Альперт и др., 1967).

Среди геологических тел, создающих локальные магнитные электрические и электромагнитные аномалии, необходимо выделить тела массивных сульфидных и оксидных руд, зон глубинных разломов, графитизированных и пиритизированных сланцев и т. д. Подобные взаимодействия отвечают ситуации перетока энергии между двумя энергоактивными зонами: астеносферой в недрах Земли и ионосферой, окружающей планету. Поскольку перенос энергии осуществляется по вектору градиентов, то следует полагать, что по причине более высокого энергетического потенциала астеносферы перенос энергии над зонами разломов в приземном слое атмосферы должен быть направлен вверх от поверхности Земли. Это пример генерации линейных полей за счет самопроизвольного процесса взаимодействия через зоны глубинных разломов природных энергонасыщенных систем, активность которых, с одной стороны, зависит от состояния Солнца и его воздействия на ионосферу, а с другой - от активности глубинных зон Земли, в частности астеносферы.

Особый интерес представляют ситуации формирования высокоградиентных зон на границах геологических тел, отличающихся по плотностным и другим параметрам. Так, на контакте массива, сложенного тяжелыми глубинными породами (перидотитами или дунитами) плотностью 3,1-3,2 г/см^3 и окруженного легкими осадочными породами плотностью 2,2-2,4 г/см^3, по линии контакта образуется стационарная градиентная зона. В этой зоне на расстоянии в несколько сот метров или первых километров (в зависимости от положения линии контакта) постоянно существует перепад гравитационных, магнитных и электромагнитных параметров (см. рис. 2.4). Возникает колебательная система с часовыми, суточными и более длительными периодами смены многих геофизических параметров. В любом случае такой режим резкой смены параметров состояния среды негативно сказывается на самочувствии людей. В еще большей мере это проявляется при глобальных возмущениях планетарных полей, во взаимодействии с которыми функционируют данные структуры. В равной мере все сказанное выше относится к тектоническим границам геологических блоков, сложенных отличавшимися по составу и свойствам горными породами.

ТЕХНОГЕННЫЕ ПОЛЯ

До стадии развития так называемой "техногенной цивилизации", а именно до начала XX в., на планете Земля наряду с глобальным геомагнитным полем существовали природные источники, аномальные по отношению к естественному фону в части генерации полей различной природы: геологические тела, прежде всего зоны глубинных разломов; ионосферные явления, связанные с деятельностью Солнца; другие явления планетарного характера, - и человек в ходе эволюции приспособился к этим полям.

А.Г. Колесник и С.А. Колесник (1996) создали математическую модель, которая позволила получить пространственно-временное распределение плотности энергии в КВ-радиодиапазоне в околоземном пространстве до высоты 1000 км. Произведена оценка уровня электромагнитного загрязнения окружающей среды, создаваемого мировой сетью КВ-радио-станций, в зависимости от уровня солнечной активности, сезона года, ши- . роты и долготы места. Поскольку за последние десятилетия уровень электромагнитного фона антропогенного происхождения на несколько порядков превысил соответствующий уровень естественного происхождения (Электромагнитные поля..., 1984), то с рассматриваемых нами синергети-ческих позиций влияние этого фактора на жизнедеятельность человека следует рассматривать как возможный скачок с неизвестными последствиями (Колесник А.Г., Колесник А.С., 1996), когда мощность только радиовещательных станций на земной поверхности составляет несколько сот мегаватт. Судя по расчетам, распределение плотности потока радиоизлучения в диапазоне частот 5-25 МГц на земном шаре крайне неоднородно и в зависимости от местоположения может изменяться на несколько порядков величины. Наибольшие значения потока радиоизлучения свойственны европейской части, далее следуют американская и азиатская части земной поверхности; при этом общее превышение уровня электромагнитного загрязнения в северном полушарии на 2-3 порядка выше величины плотности потока в южном. Весьма интересным является заключение о том, что с увеличением солнечной активности весь диапазон частот 5-25 МГц оказывается экранированным ионосферой и при этом в космическое пространство энергия наземных источников практически не просачивается. Но при низкой солнечной активности просачивание оказывается существенным, а плотность уходящей энергии оказывается сравнимой с плотностью энергии у поверхности Земли (Колесник А.Г., Колесник С.А., 1996). Этот вывод заслуживает особого внимания и может иметь в будущем

далеко идущие последствия. Дело в том, что Солнечная система сформировалась более 4 млрд лет тому назад и в ее структуре соблюдалась одна главная особенность: Солнце являлось источником электромагнитных колебаний (включая видимую часть ЭМ-диапазона), а планеты в этом отношении были пассивны, поглощая или частично отражая поток, идущий от Солнца. Ситуация изменилась в начале XX в., когда Земля стала источником электромагнитных излучений в радиодиапазоне. Определенная часть этой энергии просачивалась в околоземное космическое пространство и в считанные минуты достигала Солнца. Как известно, внешняя корона Солнца представляет собой ионизированную плазму, нагретую до 6100 °С, и это очень чувствительная субстанция по отношению к внешним электромагнитным воздействиям. В результате усиления техногенной генерации потоков ЭМ-излучения в космическое пространство возросло и его воздействие на корону Солнца, которая находится в неустойчивом метастабильном состоянии. Печальным итогом такого воздействия могут стать изменение 11-летнего цикла солнечной активности, плохо прогнозируемые стохастические вспышки в короне Солнца, а в силу проявления обратных связей и в более глубоких горизонтах Солнца.

В мега- и технополисах особую опасность представляют мощные источники ЭМИ постоянного действия, особенно теле- и радиопередающие центры. Например, в Москве в районе Останкинской телебашни предельно допустимый уровень ЭМИ в диапазоне 30-300 МГц превышен в несколько раз, иногда в 10-15, хотя по существующим инструкциям ПДУ не должен превышать 2 В/м; в удалении от телебашни в городе он не превышает 0,1 В/м (Савин, 1997). Если же в такой экстремальной ситуации проявится еще какой-нибудь негативный фактор из сферы внешнего воздействия, то в совокупности это может привести к кумулятивному действию, особенно опасному для маленьких детей.

Характеристика электромагнитных волн (табл. 2.2) позволяет оценить их взаиморасположение относительно друг друга. Сверхвысокими частотами (СВЧ) является область, в которой колебания $f > 30$ МГц, и в зависимости от длины волны в диапазоне СВЧ выделяются дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны, которые представляют наибольшую опасность для здоровья человека.

Табл. 2.2.

Характеристика электромагнитных волн (Протасевич, 1995)

Вид	Частота, Гц	Длина волны, м
Длинные	$1\text{-}10^{4}$	$3\cdot10^{8}\text{-}3\cdot10^{4}$
Радиоволны	$10^{4}-3^{10}$	$3\cdot10^{4}-10^{-2}$
Инфракрасные	$3\cdot10^{10}\text{-}4\cdot10^{14}$	$10\text{-}^{2}\text{-}7{,}5\cdot10^{-7}$
Световые	$4\cdot10^{14}\text{-}7{,}5\cdot10^{14}$	$7.5^{-7}\text{-}4\cdot10^{-7}$
Ультрафиолетовые	$7{,}5\cdot10^{14}\text{-}7{,}5\cdot10^{16}$	$4\cdot10^{-7}\text{-}4\cdot10^{-9}$
Рентгеновские	$7{,}5\cdot10^{16}\text{-}2\text{-}10^{19}$	$4\cdot10^{-9}\text{-}1{,}5\cdot10^{-11}$
Гамма	$2\cdot10^{19}\text{-}10^{21}$	$1{,}5\cdot10^{-11}\text{-}3\text{-}10^{-13}$
Космические	10^{21} и выше	$3\cdot10^{-14}$ и меньше

Табл. 2.3.

Предельно допустимые величины электромагнитной энергии на территории жилой застройки (Протасевич, 1995)

Диапазон радиоволн	Границы диапазона	Предельно допустимая величина
Длинные	30-300 Гц	10 Вт/м^2
Средние	0,3-3,0 МГц (1-0,1 км)	10 Вт/м^2
Короткие	3-30 МГц (100-10 м)	4 Вт/м^2
УКВ	30-300 МГц (10-1 м)	2 Вт/м^2
СВЧ (круглосуточное облучение)	0,3-30 ГГц (1 м - 1 мм)	5 мкВт/см^2

В табл. 2.3 приведены предельно допустимые уровни напряженности электромагнитных полей и санитарно-защитные зоны для разных видов ЭМИ. Кроме того, надо иметь в виду, что в помещениях при стечении неблагоприятных обстоятельств возможно фокусирование ЭМИ и их кумулятивное действие, особенно опасное в сочетании с шумовыми и инфраволно-выми воздействиями.

Возрастание мощности глобального электромагнитного поля в резонаторе создает предпосылки к проявлению синергетических явлений. Я.Р. Уайт (Wait, 1965) пришел к выводу, что внутри волновода, образованного Землей и ионосферой, распространение электромагнитных волн низкой и сверхнизкой частоты под воздействием геологических структур и структур земной поверхности, а также техногенных сред может приводить к канализации волн или их резонансному переизлучению, т. е. локальным эффектам усиления поля или явлениям другого типа.

По данным А.Н. Дмитриева (1987), суммарная мощность Земли в радиодиапазоне превысила адекватное излучение от Солнца. Значительная часть электромагнитной энергии, излучаемой в верхнее полупространство, приходится на ионосферу, где под этим воздействием происходят локальные разогревы и формирование пространственно-временных электромагнитных структур со своими параметрами излучения.

Интенсивное развитие коммуникационных систем на базе радиоэлектроники - радиосвязь, радиовещание, телевидение, радиолокация и т. д. -обусловило стремительное возрастание плотности электромагнитной энергии и расширение частотного диапазона непосредственно в околоземном пространстве - среде обитания человека.

Мощность радиовещательных станций только коротковолнового диапазона (1-30 МГц) за последние два десятилетия возросла почти в 2 раза и составляет более 150 МВт. Суммарная напряженность электромагнитных полей в радиодиапазоне на несколько порядков величины превышает напряженность аналогичных полей естественного происхождения; особенно возрастает напряженность электромагнитных полей в мегаполисах и технополисах, где размещены достаточно мощные радио- и телепередающие устройства, что в комбинации с маломощными, но многочисленными радиопередатчиками (включая сотовую связь) создает локальные электромагнитные аномалии с высокой напряженностью электромагнитного поля.

Развитие электромагнитных систем в XX в. характеризуется все возрастающей закачкой энергии в полость между земной поверхностью и ионосферой (~ 50 км), которая представляет резонатор, где наряду с резонансным усилением поля естественных атмосферных помех в волноводе Земля - ионосфера в диапазоне 10,6-41,1 Гц (шумановские резонансы) в последнее время фиксируются резонансные электромагнитные системы техногенного происхождения.

Вдоль высоковольтных линий происходит утечка электроэнергии не только в Землю, но и в воздушное пространство. В диапазоне акустических электромагнитных полей токи промышленной частоты (50-60 Гц) генерируют низкочастотные электромагнитные волны. Вдоль линий ЛЭП напряженность поля при особых погодных и геомагнитных режимах достигает нескольких десятков тысяч вольт на метр.

Современный крупный город, особенно с развитой промышленностью, базируется на использовании электроэнергии. Обязательным элементом любых электроустановок, вплоть до трамвайных и троллейбусных линий, является заземление токонесущих проводников, моторов и генераторов. В итоге в ареалах городов происходит закачка в землю громадного количества электрической энергии, которая в первую очередь подпитывает зоны флюидизированных глубинных разломов в пределах мегаполиса или технополиса. Таким образом, происходит техногенная закачка электрической энергии в зоны глубинных разломов, и в силу этого эффекта в пределах ме-га- и технополисов энергоемкость таких зон увеличивается многократно. Соответственно возрастают мощность и спектр генерируемых такой зоной электромагнитных излучений и инфраволн.

По данным А.Д. Жигалина с соавторами (1984), вблизи трамвайных линий напряженность электрического поля блуждающих токов в 5 раз превышает фон, а вблизи заземлений станций катодной защиты - в 15 раз. При этом размеры электрических полей в геологической среде варьируют от сотен метров до десятков километров.

В.В. Адушкин и А.А. Спивак (1995) по результатам режимных наблюдений установили, что электрическое поле в условиях мегапо-

лиса заметно выше, чем за его пределами. В Москве зафиксированы, кроме того, участки, характеризующиеся непродолжительными во времени (5-10 мин), но часто повторяющимися (до 3 раз в час) высокочастотными техногенными возмущениями электрического поля значительной амплитуды - в 5-10 раз превышающей фоновые значения. Этот факт, скорее всего, указывает на то, что в техногенном электрическом поле периодически возникают самостоятельные пространственно-временные электрические структуры, генерирующие собственное излучение. Если говорить о инфразвуковой обстановке в пределах мегаполиса, то источником инфразвука могут быть потоки тяжелогруженого автотранспорта, железнодорожные перевозки, которые генерируют, например в некоторых местах Москвы, мощные потоки инфраволн, в 15-60 раз превышающие фоновые, и в экстремальных случаях в диапазоне 0,5-20 Гц амплитуда периодически достигает 3 Па.

К сожалению, для построения синергетических моделей, в которых были бы учтены все виды возмущений - электрических, электромагнитных и ин-фраполей, еще мало исходных данных, и это задача ближайшего будущего.

Техногенное воздействие на ионосферу и тропосферу происходит главным образом за счет генерируемых излучений, в основном радиолокации и радиосвязи. Кроме того, возрастает и роль бытовой техники в закачке электромагнитной энергии в околоземное пространство.

Особую опасность представляет пространственная близость техногенных источников электромагнитных излучений и зон глубинных разломов, подпитываемых электрической энергией в пределах городов. В таких случаях взаимодействие полей этих двух источников может привести к возникновению самостоятельных пространственно-временных структур, генерирующих собственные поля с другими частотными характеристиками (рис. 2.5).

Ранее было установлено, что столь же негативное воздействие в загрязненном городском воздухе приобретает градиент потенциала электрического поля, поскольку загрязнение атмосферы оказывает значительное влияние на ее разделение и перенос электрических зарядов. Следствием этого являются снижение проводимости атмосферы в приземном слое и увеличение вертикальной составляющей напряженности электрического поля *E* (Махоткин, 1963; Адушкин, Спивак, 1995; и др.). Судя по этим данным и результа-

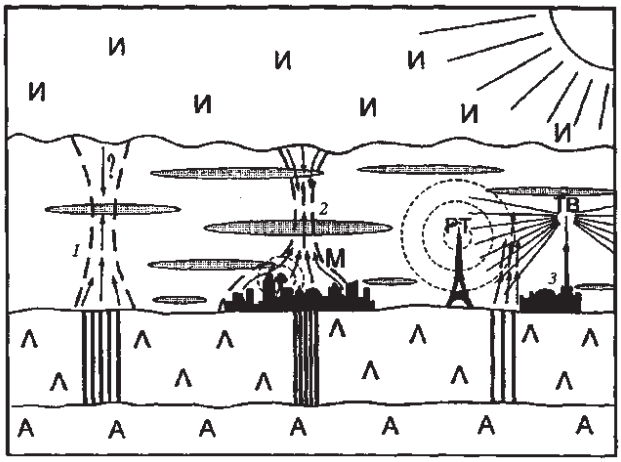


Рис. 2.5. Взаимодействие земных, ионосферных и техногенных систем: А - астеносфера; Л - литосфера; И - ионосфера. Тонким крапом обозначены протяженные "облака" атмосферного электричества. 1 - взаимодействие в системе "разлом - ионосфера"; 2 - взаимодействие в системе "разлом - мегаполис (М) - ионосфера"; 3 - взаимодействие в системе "разлом - радиотранслятор (РТ) - телетранслятор (ТВ)".

там изложенного ранее, именно увеличение вертикальной составляющей напряженности электрического поля в пределах мегаполисов наиболее негативно воздействует на человека, особенно в условиях многоэтажной застройки.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЧЕЛОВЕКА И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Человеческое тело генерирует акустические, электрические, магнитные и электромагнитные поля, которые взаимодействуют с внешними полями различной природы.

Говоря об электромагнитных волнах, не следует забывать, что, согласно Максвеллу, всякое переменное электрическое поле порождает магнитное и точно так же всякое переменное магнитное поле порождает электрическое, когда объемная плотность энергии электромагнитного поля слагается из объемных плотностей энергии электрического и магнитного полей. Но в технике и в природных условиях есть системы с преобладанием электрической или магнитной компоненты, и степень их воздействия на биологические объекты различна.

Как известно, поток солнечной радиации кроме видимого света включает другие электромагнитные колебания. И сам свет, разлагаясь на отдельные спектральные составляю-

щие, по-разному влияет на биологические объекты. Известно, что в разные периоды 11-летнего цикла Солнце изменяет интенсивность и компонентный состав солнечной радиации. Солнечная постоянная равна 1350 Вт/м^2 на границе земной атмосферы, и в зависимости от высоты стояния Солнца над горизонтом атмосфера поглощает часть этой энергии. В магнитных ситуациях эта величина снижается в 30 раз, что, естественно, приводит к снижению потока солнечной радиации. Но особенно важно то, что при этом происходит изменение спектрального состава солнечного потока. И если на границе атмосферы его максимум соответствует длине волны 470 нм, то у поверхности Земли он расположен около 555 нм (Ремизов и др., 2003). Если связать изменение спектра солнечного излучения с вариациями его у поверхности Земли и учесть, что растения и другие биологические объекты избирательно реагируют на эти изменения, то очевидна постановка вопроса о влиянии этих факторов на различные биологические объекты, в том числе на человека, особенно в плане влияния солнечной радиации на человеческую кожу. И когда в спектре солнечного излучения начинает преобладать, например, инфракрасная компонента с длиной волн от 4 до 50 мкм, то при прочих равных условиях это приведет к снижению теплопотерь с поверхности человеческого тела, которые доминируют именно в инфракрасном диапазоне. Если учесть, что инфракрасное излучение занимает область между красной границей видимого света (λ = 0,76 мм) и коротковолновым радиоизлучением (λ= 1-2 мм) с разделением на близкую (0,76-2,5 мкм), среднюю (2,5-50 мкм) и дальнюю (50-2000 мкм), то очевидно, что изменение интенсивности электромагнитного излучения как слева, так и справа отразится и на инфракрасном излучении. Отсюда становится понятно, почему в разные годы растения при прочих равных условиях развиваются и плодоносят по-разному; как сокрушенно говорят хозяйки, "нынче неогурцовый год", хотя лето ничем не отличается от предыдущего.

При изучении влияния внешних физических полей на человека следует помнить, что физиологи базируют свои исследования на наличии трех биоритмов у человека: физического - 23 дня, эмоционального - 28 и интеллектуального - 33, т. е. при тестировании человека относительно воздействия внешних полей необходимо учитывать биоритмы, которые влияют на его состояние. Установлено, что все биоритмы совпадают по фазе через 21 252 дня. На этот интервал времени приходится 79,6 % обычных и 20,4 % критических дней (Лапко, Поликарпов, 1999).

Поскольку для инфразвука характерны частоты < 20 Гц, то сюда укладываются частоты собственных колебаний тела человека в положении лежа *(3-4* Гц), стоя (5-12 Гц), колебаний грудной клетки (5-8 Гц), брюшной полости (3—4 Гц) и т. д. (Ремизов и др., 2003). Учитывая многообразие источников инфразвука (естественных и технических) и способность его распространяться на значительные расстояния, следует признать, что и в природных условиях, и в мега- и технополисах человек подвергается воздействию инфраволн. Наблюдения показывают, что усталость, раздражительность, головную боль и особенно сонливость вызывают потоки инфраволн, идущих впереди быстро продвигающихся циклонов и других атмосферных фронтов. Особенно сильно это воздействие проявляется в горах.

В человеческом организме на границах сред с разными коэффициентами поглощения электромагнитных волн, например на границе тканей с высоким и низким содержанием воды, могут возникать стоячие волны, обусловливая местный нагрев и даже перегрев тканей (Ремизов и др., 2003).

Исследования Ю.А. Холодова (1966, 1975, 1978, 1982) по влиянию электромагнитных полей на биологические объекты во многом расширили наши представления о роли такого воздействия в том числе и на человека. Он подчеркивает, что приоритеты в изучении влияния на биологические объекты спектра волн радиоволнового диапазона уступают место исследованиям по изучению влияния, оказываемого низкочастотными ЭМП промышленных частот (50-60 Гц). Но наиболее значимые эффекты наблюдаются при воздействиях ЭМП с частотами, близкими к естественным ЭМП, вызванных космо-геофизическими источниками (рис. 2.6), хотя кроме частотных характеристик большое значение имеет интенсивность ЭМП (Холодов, 1978).

А.П. Дубров (1974), изучая суточную динамику корневых выделений различных растений и сопоставляя эту динамику с колебаниями магнитного поля, установил, что именно магнитное поле играет роль внешнего синхронизатора.

Большое значение имеет понимание того, что человеческий организм не только синергетичен и многофункционален по своей природе, но и работает в 24-часовом биологическом режиме.

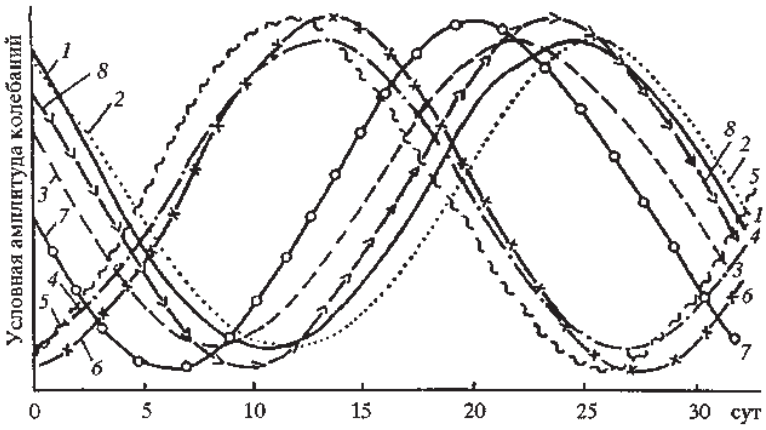


Рис. 2.6. Фазовая координация месячных ритмов иммунологических и гелиофизических показателей с 12 марта по 12 апреля 1984 г.: 1 - концентрация лейкоцитов; 2 - концентрация нейтрофилов, 3 - концентрация лимфоцитов; 4 - активность комплемента; 5 - числа Вольфа; 6 — радиоизлучение Солнца на волне 3000 МГц; 7 — $A_к$-индекс; 8 — радиоизлучение Солнца на волне 204 МГц (Чиркова и др., 1987).

Именно нервная регуляция порождает опосредованные связи второго и третьего порядка, то же самое можно говорить и об обратных связях (Поттер, Орфали, 1997). Состояние гомеостаза человека покоится на "трех китах": центральной нервной системе, вегетативной нервной системе и метаболизме. Поэтому при проведении медицинского мониторинга внешних воздействий необходимо комплексное изучение наиболее информативных признаков, позволяющих оценить отклонение их от средних значений, которые иногда считаются "нормой".

"Ученые сегодня приходят к заключению, что здоровье - это тонкий баланс между хаосом и порядком. Для нормального функционирования практически всех систем жизнедеятельности человека характерен некоторый промежуточный режим между хаосом и порядком, режим детерминированного хаоса" (Горбачев, 2003, с. 68).

Человек является резонансной системой, когда синхронизация и десин-хронизация работы отдельных органов могут происходить под воздействием внешних сравнительно слабых сигналов. Совершенно не изучена область автосинхронизации внутренних органов человека, когда усиление электромагнитного поля или частотных характеристик какого-то внутреннего органа оказывает влияние на другой орган, ранее работавший в резонансе, а теперь вышедший в режим десинхронизации. Как следует из опубликованных данных, слабые поля, резонансные к ряду ритмов организмов, в частности на частотах 7 и 12 Гц, могут оказывать существенное влияние на весь человеческий организм (Горбачев, 2003).

Как известно, кровь характеризуется электропроводностью, и составляющие ее частицы обладают магнитными моментами (Горбачев, 2003). В этом плане встает вопрос: в какой мере кровь разного состава реагирует на изменение внешних физических полей? Отсюда же возникает второй вопрос: как меняется соотношение эритроцитов (гемоглобин и концентрация CO_2), лейкоцитов (иммунитет и защитные свойства организма от чужеродных элементов), тромбоцитов (реологические свойства крови и способность к свертыванию)? Практика последних десятилетий свидетельствует о том, что дети, родившиеся и выросшие в мегаполисах, имеют ослабленную иммунную систему (по определению врачей Москвы, это так называемые "дети центра"), из чего следует, что в ходе постоянного воздействия электромагнитных полей разной природы в первую очередь страдают лейкоциты.

Внутренние органы человека генерируют электромагнитные волны разной частоты, в том числе радиодиапазона. Предполагается, что сердце представляет собой поляризационный генератор СВЧ-волн (Горбачев, 2003), высокочастотные колебания распространяются по кровеносным сосудам как по диэлектрическим волноводам. Эти поля могут выходить за стенки кровеносного волновода. Свои поля имеет и лимфатическая подкожная система, в таком качестве она регулирует биопотенциал на поверхности кожи. Все перечисленные поля особенно четко фиксируются методами электроакупунктуры в особых биологически активных точках, давно известных в тибетской и китайской медицинах. Исходя из строения человеческого тела и разделения функций мозга между правым и левым полушариями, ряд заболеваний рассматривают как нарушение энергообмена между левой и правой половинами, и лечение проводится путем выравнивания электрического потенциа-

ла между соответствующими точками человеческого тела.

Особый интерес представляют точки, чувствительные и к другим внешним воздействиям, например к инфразвуку. Как известно, инфразвук характеризуется частотами < 20 Гц, но может и сопровождаться шумом, который воспринимает человеческое ухо. Поскольку инфразвук слабо поглощается разными сферами и поэтому способен распространяться на большие расстояния, характеризуясь большей длиной волны, чем воспринимаемый человеческим ухом шум, он способен фокусироваться, дифрагировать и проникать в помещения. Предполагается, что негативные воздействия инфразвука на человека имеют резонансную природу, и спектр неблагоприятных симптомов во многом определяется индивидуальными особенностями и функциональным состоянием организма. Наиболее характерными проявлениями воздействия инфразвука можно считать недомогание, общую слабость, усталость, сонливость, раздражительность, головную боль, спазм сосудов, нарушение сердечного ритма и десинхронизацию работы внутренних органов человека. При этом резонансные явления в организме наиболее негативны, когда амплитуда вызванных внешним воздействием колебаний неограниченно возрастает при совпадении их с частотой собственных колебаний отдельных органов или всего организма в целом. В основе этого эффекта лежит механизм энергетического вампиризма у людей.

Частоты собственных колебаний тела человека в положении лежа -*3-4* Гц, стоя - 5-12 Гц, собственных колебаний грудной клетки - 5-8 Гц, брюшной полости *3-4*- Гц, что соответствует частоте инфразвуковых колебаний (Ремизов и др., 2003). Инфракрасное (ИК) тепловое излучение для всей поверхности кожи -100 Вт, а кора головного мозга излучает ИК-волны 3-14 мкм при интенсивности 10 мВт/см^2.

В дециметровом диапазоне радиотепловое излучение внутренних органов человека является результатом комбинирования электромагнитного излучения с тепловыми полями и хорошим диагностическим методом определения состояния внутренних органов. В инструментальной физикодиагнос-тике применяются и другие комбинации методов: в диапазоне 0,15-0,20 ГГц возможны генерация акустоэлектрических волн, низкочастотных акустических сигналов (акустические фотоны и ультразвук), оптическая хемилюми-несценция - разрешение ~ 1000 фотонов с 1 см^2 и т. д. (Горбачев, 2003).

Согласно Ю.А. Холодову (1966), биология рассматривает около 14 порядков индукции магнитного поля. Самая главная проблема - взаимодействие внешних магнитных и электромагнитных полей с внутренними полями, генерируемыми самими органами. Внешние электромагнитные поля биологической природы фиксируются в инфранизкочастотном и низкочастотном диапазонах. Их источники: а) электрические и магнитные поля, генерируемые отдельными органами, мышцами, сердцем, мозгом, нервами - амплитуда их магнитной составляющей достигает 10~^{7}-10~^{3} нТ; б) поля поверхностных электрических зарядов на теле человека, животных, птиц или насекомых - амплитуда до сотен и тысяч милливольт; в) электромагнитные поля, обусловленные динамикой электрофизических свойств биотканей, достигают сотен милливольт.

Величина переменного магнитного поля сердца составляет 1О$^{-7}$-1О$^{-8}$ Гс, головы ~ 10^{-9} Гс. Для головы человека определяющим является альфа-ритм с электрическими колебаниями в интервале 8-12 Гц, когда магнитосиловые линии направлены с левой половины к правой (Дубров, 1974). Поскольку интервал частот 7-12 Гц соответствует частоте электрической активности альфа-ритма 0,029-0,031 Гц сверхмедленных колебаний потенциалов головного мозга, то уже из этого факта очевиден диапазон частот, воздействующих на мозг человека. Синергетическая картина кооперативного воздействия различных электромагнитных полей на биологические объекты сложна и неоднозначна. И если, как справедливо подчеркивает А.П. Дубров (1974), ГМП является глобальной и единой пространственно-временной координатой для живых организмов, то возникающие дискретно пространственно-временные диссипативные структуры - генераторы электромагнитных волн и физических полей, импульсы ЭМГ энергии, синхронные автоколебания, квазистохастические волны и дискретные автономные источники импульсной активности могут эмерджентно усиливать или, наоборот, ослаблять воздействие друг друга. В силу этого обстоятельства сочетание слабых электромагнитных полей и их кооперативное воздействие наряду с воздействи-

ем других факторов может иметь в некоторых случаях не только отрицательный эффект для живых организмов, но и положительный. Этот вопрос до сих пор не изучен.

В науке о человеке утвердилось мнение об организме как мультиосцил-ляторной системе, функционирующей в режиме суточных, сезонных и других ритмов, имеющих различную и периодическую характеристики.

Исследования Н.А. Темурьянц с соавторами (1992) показали, что изменение солнечной активности сказывается на функциональном состоянии организма, выступая в роли принудительного синхронизатора биологических ритмов. По данным Ю.А. Холодова (1966), из всех систем человеческого организма первой на магнитные поля реагирует нервная система и особенно кора головного мозга.

Заслуживает внимания экспериментально установленный факт, когда на основании более чем 24 000 измерений пульса у практически здоровых людей в возрасте 20-40 лет была обнаружена корреляция между частотой сердечного ритма и изменением элементов ГМП. Примечательно, что влияние ГМП на ритм сердечной деятельности в значительной мере обусловлено **изменением направления вектора поля в вертикальной плоскости наклонения** (подчеркнуто нами), а не величиной общей напряженности поля (Кайбышев, 1978). Вероятно, в этом явлении и отражается степень взаимодействия между теллурическими, тропосферными и ионосферными полями, что и определяет в итоге воздействие на биополе человека и выведение его из гомеостаза. Суть этого эффекта заключается в том, что силовые линии естественного магнитного поля распространяются субгоризонтально, а в аномальных ситуациях линии магнитного и электромагнитного полей занимают иное (вплоть до вертикального) положение, что "непривычно" для человеческого организма.

Томскими радиофизиками (Колесник А.Г., Колесник С.А., 1996) установлено, что в диапазоне частот от 1 до 40 Гц спектр низкочастотного электромагнитного излучения совпадает со спектром частот биоритмов человека или близок к нему.

Весьма интересной представляется проблема восприимчивости человека к слабым магнитным полям в пределах 3-5 % величины ГМП в зависимости от общей суммарной напряженности техногенного магнитного поля. Судя по экспериментальным данным, в городских условиях человек реагирует на воздействие магнитного поля с частотой 0,01-5 Гц и напряженностью 1000-2000 гамм. В сельской местности при снижении уровня помех до 10 гамм человек реагирует на колебания искусственного магнитного поля напряженностью 200 гамм. Очевидно, что магнитные и электромагнитные "шумы" заглушают или экранируют воздействие отдельного магнитного поля, и эта проблема взаимного ослабления или усиления (вплоть до резонанса) различных магнитных и электромагнитных полей еще требует своего решения.

Судя по данным В.В. Адушкина и А.А. Спивака (1995), инфразвуковые возмущения с частотой 6-8 Гц оказывают в высшей степени негативное влияние на эмоциональное и психическое состояние человека. Особенно опасен звук с амплитудой 6,3 Па.

Эффект, открытый супругами Карлиан, позволил получать своеобразные отпечатки - "ауры" на фотопленке. Суть эффекта заключается в том, что если поместить биологический объект, лист растения, кисть руки и т. д. в высокочастотное электромагнитное поле высокой напряженности, то на фотопленке фиксируются отпечатки "ауры", интенсивность которых и состояние зависят от состояния биологического объекта. Так, по мере того как лист увядает, его "аура" медленно угасает, "аура" частей человеческого тела зависит от состояния человека и изменяется во время болезни или стресса. Иными словами, такая "аура" отражает энергетический потенциал биологического объекта, а если перейти на язык термодинамики, то изменение свободной энергии по мере удаления системы от состояния гомеостаза в ту или другую сторону.

Судя по данным Г.Ф. Плеханова (1978, 1990, 1996), в диапазоне частот от 0 до 1000 Гц и в интервале напряжений от долей вольт на метр или ампер на метр до 10 кВ/м или кА/м и длительности воздействия от секунд до многих месяцев среднестатическая величина ответной реакции биосистем не превышает 20-30 % от исходного состояния, что дает основание для вывода о том, что низкочастотные поля можно отнести к мягко и слабо действующим факторам. Далее следует наиболее важный вывод о том, что естественные и слабые искусственные низкочастотные электромагнитные поля обладают сигналь-

ным, регулирующим и дестабилизирующим действием на биосистемы, наиболее четко регистрируемым на организационном и **субклеточном** уровнях. Иными словами, воздействие в наибольшей мере отражается на информационной матрице, когда носителем информации является клетка, что подтверждает вывод о роли малых и сверхмалых доз физико-химического воздействия именно на клеточном уровне.

От представлений о разовом электромагнитном воздействии ЭМИ, связанном со вспышками на Солнце, Э.Н. Чиркова (Чиркова и др., 1987) перешла на хорошей математической основе к анализу корреляции с гелиофи-зическими ритмами. Сначала ей была создана математическая модель выявления иерархии достоверных ритмов в динамике иммунологических показателей, и на этой основе она смогла выявить натуральные параметры месячных гелиоритмов и биоритмов иммунологических показателей в крови здоровых мужчин. На основании математической обработки исходных данных определялись параметры ритмов изменения показателей внешней среды: 1) чисел Вольфа; 2) геомагнитной возмущенности ($A_к$-индекса); 3) радиоизлучений Солнца на волнах 3000 и 204 МГц; 4) атмосферного давления; 5) относительной влажности воздуха; 6) температуры воздуха и 7) скорости ветра (все показатели замерялись синхронно со взятием крови у испытуемых) (Чиркова и др., 1987).

Результаты проведенного исследования отражены на рис. 2.6 и в сжатом виде сводятся к следующему: "...наличие связи биоритмов иммунологических показателей крови здоровых людей с гелиоритмами оценивается не только по совпадению частот колебаний, но в еще большей степени фазовой координации био- и гелиоритмов, что подтверждает и конкретизирует известную теоретическую концепцию о глубокой связи биоритмов с ритмами изменения солнечной активности, об информационной функции естественных электромагнитных полей и, наконец, об электромагнитной природе биологических часов и клеточной дифференцировки, осуществляющей механизм резонансной связи солнечной энергии с электромагнитными полями клеток и тканей" (Чиркова и др., 1987, с. 107). Судя по сказанному, объективную картину влияния внешних полей на человеческий организм можно получить лишь проводя своеобразный мониторинг как минимум в течение месяца с обобщением полученных данных по специальным компьютерным программам (Никитин, Новиков, 1986). Такой подход позволит в дальнейшем выявить индивидуальные особенности отдельных людей как реакцию на изменение параметров среды обитания человека с неограниченным числом показателей.

Одной из актуальных проблем синергетики является изучение слабых и сверхслабых полей и излучений в биологии и медицине. По сути дела эти исследования были стимулированы Е.Б. Бурлаковой с сотрудниками и посвящены особенностям действия сверхмалых биологически активных веществ и физических факторов низкой интенсивности на биологические объекты (Бурлакова, 1999а, б). Парадоксальность этих результатов заключалась в том, что в опытах по изучению влияния антиоксидантов на электрическую активность изолированного нейрона виноградной улитки максимальный эффект достигнут при концентрациях 10^{-15} и 10^{-7} моль. Аналогичные закономерности были зарегистрированы в экспериментах на животных при введении им холиномиметика аретолина (Бурлакова, Хохлов, 1985). Эти же авторы изучали влияние сверхмалых доз (СМД) биологически активных веществ в широком диапазоне — от макромолекул, клеток, органов и тканей до животных, растительных организмов и даже популяций. Процитируем, пожалуй, главнейший вывод из всего сделанного этими исследователями: "Результаты проведенных исследований привели нас к мысли о том, что мы имеем дело не с особенностью действия одного какого-то препарата или ответа одного какого-то биологического объекта, а с некими принципиально новыми закономерностями взаимодействия биологических объектов со сверхмалыми дозами биологически активных веществ. Каждому из этих веществ может соответствовать специфическая мишень, свой механизм усиления, присущие только ему особенности метаболизма" (Бурлакова, 19996, с. 3).

Этими же авторами экспериментально доказано, что при введении в организм вещества в дозах $1О^{-12}$-$1О^{-13}$ М в клетке будет содержаться хотя бы от 1 до 10 молекул данного вещества. Исходя из этого к СМД следует отнести концентрации 10^{-12} М и ниже.

Данный экскурс в биохимию показывает, что в таком многофункциональном и сложном по строению человеческом организме обычные линейные зависимости теряют смысл, посколь-

ку мы сталкиваемся с сугубо нелинейными явлениями, когда отклик биологической системы на химическое воздействие не адекватен количеству введенного реагента, а закон действующих масс Вант-Гоффа перестает работать и в значительной мере теряется понятие концентрации (Бурлакова, 19996, с. 7). Не входя в сферу выяснения механизмов реализации данного эффекта, что, кстати, лежит за пределами нашей профессиональной ориентации, заметим, что применительно к биологическим объектам эти результаты имеют огромное значение, поскольку через них мы входим в область таких понятий, как "много", "мало", "доза" и т. д. В значительной мере это относится к определению вредных радиационных воздействий на биологические объекты, в том числе на человека, что приводит к несовпадению пороговых значений в разных справочниках и инструкциях по технике безопасности.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРОБЛЕМЫ

Принцип бритвы Оккама (XIV в.) таков: чем ближе мы находимся к некоторой истине, тем проще оказываются основные законы, ее описывающие.

Потеря любой системой устойчивости приводит к генерации энергетических импульсов, природа которых может быть различной. В одних случаях это сейсмические волны, в других происходит генерация электромагнитных и электрических полей или выбросов электромагнитной и электрической энергии импульсного характера. По своим параметрическим характеристикам они могут перекрываться с полями, имевшими техногенную природу.

В контексте рассматриваемой проблемы особое значение приобретает вопрос о характере и степени взаимодействия ГМП с канальными полями естественной и техногенной природы и кооперативном, синергетическом воздействии их на человека.

Неоднократно подчеркиваемое Ю.Н. Авсюком (1996) своеобразие системы Солнце - Земля - Луна во многом предопределяло и предопределяет механизмы их взаимодействия при главенствующем влиянии Солнца (масса $2{\cdot}10^{30}$ кг) по отношению к Земле (масса 610^{24} кг) и Луне (масса $7{\cdot}10^{22}$ кг), когда Земля притягивает Луну с силой $F = 10^{20}$ Н, Солнце притягивает Землю с силой 10^{22} Н (Горбачев, 2003), а центр масс Солнце - Земля - Луна расположен внутри Земли на расстоянии 0,8 земного радиуса. Следует иметь в виду, что центр масс не остается на одном месте, а перемещается внутри Земного шара; влияние этого эффекта на состояние электромагнитных систем в приповерхностном слое планеты никем не изучалось и такая постановка вопроса нам не известна.

Электромагнитные бури, возникающие при взаимодействии земной ионосферы и магнитосферы с потоками разнообразных частиц (электроны, протоны, нейтроны) и электромагнитных волн различных частот, образующихся при солнечных вспышках, как известно, болезненно воспринимаются человеком, особенно детьми, людьми преклонного возраста и больными с электростимуляторами сердца, и практически все системы человеческого организма в той или иной мере реагируют на электромагнитные поля. При анализе суточных данных плотности потока радиоизлучения на поверхности Земли, создаваемого мировой сетью радиовещательных станций КВ-ди-апазона, была выявлена значимая корреляция параметров биоритмов человеческого мозга и электрокардиограммы человека с динамикой электромагнитного фона (Колесник А.Г., Колесник С.А., 1996).

Актуальность поставленной проблемы очевидна в контексте современных представлений о человеческом организме как мультиосцилляторной системе с высокой степенью взаимной согласованности внешних ритмических факторов и внутренних биологических ритмов. Очевидно, если действительно существует связь между динамикой окружающего электромагнитного поля и ритмами человеческого организма, представляющего автоколебательную систему, то изменение динамических и энергетических параметров электромагнитного поля может привести к развитию необратимых явлений десинхронизации отдельных органов и рассогласованности биоритмов человека.

Индивидуальность каждого организма, тем более в различной электромагнитной среде, проявляется в разной чувствительности и многообразии форм ответных реакций биологических объектов на малые и ультрамалые воздействия разнообразных электромагнитных систем.

Говоря о прямом воздействии ЭМИ на биологические объекты и оценке эффектов такого воздействия, подразумевают воздействие или на организм в целом или на от-

дельные клетки. Шагом вперед, позволяющим посмотреть на данную проблему под другим углом зрения, явились исследования Е.Б. Бурлаковой с сотрудниками. Ими экспериментально было доказано, что "...действие синтетических антиоксидантов, изменяющих уровень окислительных реакций мембранных липидов, носит двоякий характер, что предположительно объясняется двумя путями воздействия на клетку - прямым и опосредованным через **регуляторную структуру"** плазматической мембраны (Бурлакова, Хохлов, 1985, с. 557). Иными словами, обращаясь к рассматриваемой проблеме воздействия ЭМИ на биологические объекты, мы выходим на совершенно иной качественный уровень понимания сути изучаемого явления, когда электромагнитное воздействие может и не нарушить функциональное состояние клетки, но повлиять на ее регуляторную структуру, которая во многом несет функцию передачи и накопления информации, что в свою очередь регулирует течение процессов метаболизма в настоящее время и на ближайшую перспективу. Это очень важный вывод, ибо после ЭМИ-воздействия биохимические исследования могут и не зафиксировать изменений на клеточном уровне или в работе внутренних органов, но воздействие на регуляторную систему на уровне передачи и накопления новой информации может стать той "миной замедленного действия", которая сработает позднее или даже в последующих популяциях, или, как указывают Е.Б. Бурлакова и А.П. Хохлов (1985, с. 564), "...происходит сложение двух важнейших функций клеточных мембран - регуляторной и информационной, что выражается в последовательном распространении по различным мембранам информации в ответ на действие сигнального вещества с переходом всех структур на новый метаболический уровень". Следовательно, необходимо четко представлять, что появление новых видов ЭМИ, которых не было ранее (до XX в.), прежде всего привносит в живые организмы на клеточном уровне принципиально новую информацию о состоянии окружающей среды, и эта информация кодируется на субклеточном и генном уровнях, а последствия такого массированного информационного воздействия трудно предсказуемы.

Вывод А.М. Кузина (1995) о том, что атомная радиация, в окружении которой человечество живет тысячелетия, необходима для его существования, в равной мере справедлив и в отношении естественных электромагнитных полей теллурического, солнечного и космического происхождения. Как и в примере с атомной радиацией, электромагнитное воздействие, только достигнув определенного предела, начинает негативно влиять на человека и другие биологические объекты, а перейдя пороговое значение становится губительным для процессов жизнедеятельности. Сложность заключается еще и в том, что создаваемые техногенной цивилизацией электромагнитные излучения являются для него "новыми". Человеческое сообщество столкнулось с ними впервые, и о негативных последствиях от действия этого феномена можно только догадываться.

В.П. Ямскова и И.А. Ямсков (1999) развивают весьма интересную с точки зрения синергетики принципиально новую концепцию о влиянии сверхмалых доз на биологические объекты. По их представлениям, межклеточное пространство - это сложноорганизованный гель, включающий биополимеры в высокой концентрации и воду. В основе рассматриваемого феномена лежит эффект изменения основных процессов, обусловливающих прохождение регулярного сигнала в биологических системах. Суть новой концепции заключается в следующем: "... все живые организмы обладают единообразно устроенной системой, функция которой заключается в восприятии, считывании, распространении и уничтожении информации, постоянно поступающей извне. Производимый физико-химическими факторами в СМД биологический эффект обусловлен тем, что в основе его лежат механизмы, аналогичные механизмам, по которым в биологических системах постоянно протекают гомеостатические процессы... такая система передачи информации должна быть универсальна для любых биологических объектов и функционировать с высокой степенью надежности. Этим требованиям удовлетворяет система надмолекулярных структур микроокружения клетки" (Ямскова, Ямсков, 1999, с. 74).

На наш взгляд, такой принципиально новый подход переводит проблему о влиянии малых и сверхмалых доз воздействия на биологические объекты в принципиально иную плоскость. Действительно, если информация о внешнем воздействии является главной сиг-

нальной системой (один из управляющих параметров) в сохранении состояния гомеостаза на разных иерархических уровнях биологического объекта, от клетки до особи в целом, то **постоянное** действие физико-химических параметров на уровне даже СМД может провоцировать в системе процессы, направленные на сохранение данной микро- или макросистемы в состоянии гомеостаза. Именно такой подход позволяет всякое внешнее воздействие рассматривать прежде всего как информационный импульс, за которым в данной системе может последовать значительно более сильный отклик.

Для синергетики, которая рассматривает человеческий организм как единую систему, наиболее близок физиологический подход, поскольку "физиология - наука о функциях целостного организма" (Наточин, 2004, с. 975). Современная физиология использует методы исследования из самых разнообразных областей наук для получения информации о состоянии внутренних органов человека.

Огромное число систем на Земле функционирует в колебательном режиме. В неорганическом мире это приливные явления, глобальные вариации магнитного и электрического полей, суточные упругие колебания земной коры и многое другое (Авсюк, 1996). Это относится и к биологическим объектам, для которых суточный ритм определяет все течение процессов, и колебательный режим их очевиден. Как показано многими исследователями, существование человека подчинено различным ритмам.

Необходимо выделять вынужденные колебания, возникающие в системе под действием внешней силы, когда амплитуда таких колебаний в той же мере прямо пропорциональна амплитуде вынужденной силы. Амплитуда вынужденных колебаний имеет максимальное значение при некоторой определенной частоте вынуждающей силы, называемой резонансом (Ремизов и др., 2003).

Поскольку в человеческом теле различные органы имеют собственные частоты колебаний и соответственно резонансные частоты, то отклик этих органов на внешние воздействия различен. Например, ЭМИ-частоты воздействуют на сердце и кору головного мозга и не оказывают никакого влияния на другие органы. В еще большей мере это относится к ультразвуковым воздействиям. И хотя существует мнение, что внутренние органы человека обладают достаточно высоким уровнем сопротивления таким внешним колебаниям и коэффициент затухания волн внутри человеческого тела достаточно велик (Ремизов и др., 2003), но с точки зрения синергетики даже слабые постоянные резонансные воздействия способны выводить организм из состояния гомеостаза и приводить к негативным последствиям. Более того, поскольку внешние воздействия, вызывающие колебания, также могут иметь апериодичный характер и изменяться по частоте и амплитуде, то такая смена в равной мере может оказать негативное воздействие на их функционирование, тем более в режиме резонанса. Иными словами, колебательные режимы, воздействующие на биологические объекты, имеют различную природу, и уже в силу этого обстоятельства распознавание природы таких воздействий имеет первостепенное значение.

Все сказанное относится и к автоколебательным системам, которые сами регулируют периодическое восполнение растраченной энергии и поэтому могут колебаться длительное время, например сердце или легкие. Источником энергии, питающим их, является кислород воздуха, в организме есть органы, регулирующие эти колебательные системы, которые по механизму обратной связи, в свою очередь, воздействуют на регулирующие органы. Доказано, что и инфраволны и ЭМИ оказывают влияние как на регулирующие органы, так и на сами колебательные системы. В плане изменчивости организмов под постоянными внешними воздействиями, или дарвиновской теории эволюции, естественно появление в XX-XXI вв. людей, очень чувствительных к электромагнитным или инфразвуковым воздействиям техногенной природы. Прежде всего это относится к технополисам и мегаполисам, где уже начиная от рождения (если не от зачатия?) и всю жизнь организм человека подвергается мощным электромагнитным, ин-фраволновым и звуковым воздействиям, включая не только шум городского транспорта, но и сверхмощное звуковое сопровождение массовых развлекательных мероприятий. В совокупности все это оказывает негативное влияние на человека и предопределяет появление новой породы людей, гиперчувствительных к перечисленным выше воздействиям.

Значительно сложнее проблема антропогенных ЭМП, создаваемых разнообразными устройствами техносферы. Различные системы человеческого организма (сердце, легкие, органы желудочного тракта, Нервная система и др.)

работают в своих специфических биоритмах и по-разному реагируют на ЭМП той или иной частоты. Сложно и подчас непредсказуемо влияние электрических и особенно магнитных полей на иммунную систему, неясны генетические и другие отдаленные и опосредованные последствия воздействия ЭМП на человека. Высокая адаптационная способность человека вносит свои благоприятные коррективы. Поэтому нестационарные и особенно импульсные воздействия могут оказаться более неблагоприятны, чем квазистационарные и стационарные. Особенно сложным, а порой непредсказуемым может быть неблагоприятное совместное воздействие переменных и постоянных магнитных полей, могущих способствовать возникновению "циклотронного", или " параметрического " резонанса в аминокислотах клеточных мембран человеческого организма (Леднев, 1996). Все это крайне осложняет проблему нормирования допустимых параметров ЭМП и соответствующую сертификацию промышленной продукции, поступающей на рынок. Никак нельзя согласиться с принятой в настоящее время методикой установления "предельно допустимых уровней" (ПДУ) для каждого отдельного вида воздействия или суммирования их по тепловому эффекту. Необходимо учитывать специфику отдельных источников и объективно определять интегральный эффект от различных источников (Костенко, 1984).

Как правило, в работах, посвященных изучению эффекта воздействия электромагнитного излучения низкой интенсивности на биологические и физико-химические системы, нет единомыслия. Полученные результаты могут толковаться двояко, ибо слабые воздействия вызывают столь же незначительный отклик системы, на которую было произведено воздействие. Вместе с тем в большом числе работ отмечаются случаи значительного нарастания отклика системы при сравнительно малом монотонном воздействии, что наводит на мысль о проявлении резонансных феноменов в подобных нелинейных системах.

А.В. Карнаухов (1997) ввел понятие о диссипативном резонансе, который может обеспечить кооперативность эффектов поглощения электромагнитного излучения, концентрацию и накопление энергии внешнего поля в определенных структурах биологических и физико-химических систем. Иными словами, это проявление синергетического эффекта нарастания колебаний под действием внешних периодических сил за счет образования в системе структуры порядка с квазипериодическим характером изменения некоторых параметров такой системы. Автор подчеркивает, что отличительной чертой диссипативного резонанса является отсутствие определенной резонансной частоты, ибо система обладает способностью "настраиваться" на произвольную внешнюю частоту. По его мнению, диссипатив-ный резонанс может проявляться в ДНК, РНК, белках, клетках, ядрах и мембранах, а также в коллоидных растворах.

Явления стохастического резонанса могут отмечаться совместно с таковыми диссипативного и служат примером кооперативного воздействия слабых электромагнитных полей на биологические и физико-химические системы. Такой подход к анализу явлений, связанных со слабыми электромагнитными воздействиями на биологические объекты, позволяет с принципиально новых позиций подойти к анализу феноменов, обусловленных длительным воздействием полей низкой интенсивности на биологические объекты, когда на фоне слабого воздействия в силу проявления кооперативного синергетического механизма возможны резонансные флуктуации нелинейного характера.

Реакция организма на действие малых доз облучения - это функция дозы, мощности облучения и времени, прошедшего с начала облучения (Бур-лакова, 1999). Вместе с тем остается открытым очень важный для нас вопрос - о роли длительности и постоянства воздействия какого-либо излучения на организмы. Из опыта изучения подобных зависимостей, приведенного в данной работе, следует, что длительное постоянное воздействие даже слабого излучения может отразиться на функционировании структурных микроэлементов организма вплоть до его отдельных органов. Иными словами, постоянное воздействие становится одним из факторов состояния окружающей среды и закрепляется на уровне клетки или даже генном, становясь аналогичным химическому воздействию в сверхмалых дозах.

Мы не раз подчеркивали, что при оценке негативного воздействия различных видов излучений огромную роль играет не только состояние организма, но и наследственный фактор. Эти вопросы находятся в сфере так называемой адаптационной медицины (Меерсон, 1991), которая рассматривает проблему адаптации организмов к новым, изменившимся условиям. Ф.З. Меерсон (1991) сформулировал важное понятие "структурной цены адаптации", где особое внимание уделяется не только индивидуальной устойчивости человека или животных к факторам внешней

среды, но и большой зависимости такого воздействия от наследственных факторов, когда именно генетические особенности в значительной мере определяют индивидуальную устойчивость к факторам среды - возможность или невозможность адаптации к ним.

Нервная и иммунная системы - это основные регуляторные системы организма, в работе которых много общего, поскольку они обладают памятью на внешние воздействия, которые не наследуются. Более того, установлены различные механизмы взаимодействия этих двух систем, когда в центральной нервной системе обнаружены не только зоны, влияющие на иммунную систему, но и область, работа которой контролируется иммунологическими реакциями (Гордон и др., 1982; Корнева, Шеноян, 1982; Меерсон, 1991). С позиций синергетики значимость этого факта достаточно велика, ибо позволяет выявить синергетические связи не только между организмом и внешними воздействиями, но и внутри организма.

Исходя из постулатов синергетики, неизбежным следствием воздействия на открытую систему извне должно быть признано ее стремление адекватно отреагировать на внешнее возмущение за счет процессов в самой системе, идущих по линии минимизации локального производства энтропии, пока система не перейдет в состояние наименьшей диссипации энергии. Иными словами, в таких системах реализуется механизм авторегуляции в той мере, в какой система обладает запасом свободной энергии, который позволит ей адекватно отреагировать на внешнее воздействие и не выйти из стационарного состояния, т. е. состояния гомеостаза. Поэтому отклик на клеточном уровне при СМД-воздействиях более вероятен, чем отклик "большой" системы в целом, поскольку требует неизмеримо меньших энергетических затрат. И в этом плане рассуждения о прямой связи мощности воздействия и величины гомеостатического сдвига в биологической системе теряют свою актуальность, ибо главный вывод из всего сказанного выше следующий: любые физико-химические воздействия на биологические объекты в малых или сверхмалых дозах в силу низкого энергетического потенциала не могут оказать непосредственного влияния на биологическую мегасистему в целом; объектом таких воздействий являются надмолекулярные клеточные и околоклеточные структуры. Мгновенный отклик системы на малые воздействия реален именно на субмолекулярном уровне. Но поскольку длительное воздействие в малых или сверхмалых дозах ведет к накоплению новой информации, поступающей извне, то в итоге по истечении определенного времени в мегасистеме могут проявиться процессы, направленные на противодействие этому внешнему воздействию и сохранение системы в состоянии гомеостаза или направленные на перевод ее в новое стационарное состояние, в новое состояние гомеостаза. В любом случае это сопровождается потерей устойчивости всей системой, т. е. отклонением макробиологического объекта от какого-то среднего состояния гомеостаза, на сенсорном уровне - это дискомфорт и болезненное состояние. Иными словами, любое длительное воздействие на макробиологические объекты, включая человека, может быть быстро зафиксировано на клеточном или субмолекулярном уровне, но постепенное накопление новой информации на клеточном уровне через какое-то время может привести к спонтанной перестройке всей системы, и этот процесс будет протекать в соответствии с законами нелинейной термодинамики достаточно быстро - скачком. Поэтому возможно, что отклонение состояния людей от каких-то усредненных параметров может характеризовать не болезненные явления, а "гомео-статическую ломку" всей системы в целом, переход ее в новое, более устойчивое в данных условиях состояние. Понятно, что сам процесс такого перехода и его длительность - это функция многих переменных, и синергетиче-ские подходы в решении данной проблемы, встающей перед нами на пороге XXI в., могут оказаться весьма плодотворными.

Для биогеофизики важен диапазон ультранизких (УНЧ) и сверхнизких (СНЧ) частот от единиц до нескольких десятков тысяч герц, распространяющихся в приземном пространстве в области волновода, ограниченного земной поверхностью и нижней частью ионосферы. Слоисто-сферическая структура верхних частей литосферы, неоднородности рельефа, региональные электрические поля в тропосфере и ионосфере могут приводить к канализации волн или резонансному их переизлучению, что сопровождается локальными эффектами усиления или ослабления поля, дифракции и фокусирования волн или их поляризации (Альперт и др., 1967).

Если рассматривать активный флюидизированный разлом как конденсатор, работающий в колебательном режиме, то с позиций синергетики функционирование системы "разлом - ионосфера" будет зависеть от активности Солнца. Ночью ввиду снижения энергетического потенциала ионосферы эта связь ослабевает, а днем возрастает, достигая максимума в середине дня.

Несмотря на недостаток данных, довольно аргументированно утверждение о проникновении электрических полей, генерируемых в ионосфере и магнитосфере, в приземные слои и, наоборот, полей, создаваемых вблизи земной поверхности, на большие высоты, не говоря уже о том, что непосредственные возмущения могут быть вызваны мощными грозовыми фронтами. В то же время однозначно установлено, что над приземным слоем зон активных геологических разломов наблюдается повышенный уровень естественного импульсного электромагнитного поля даже в условиях сейсмического покоя.

В этом плане особое значение приобретает флюидный режим зоны разлома. При восстановительном характере флюидов и трансформации химической энергии в электрическую (электромагнитную) потоки заряженных частиц и электрическое поле над разломом имеют положительный заряд. Разломы с окисленными флюидами служат носителями отрицательного заряда. Не требуется особых доказательств, что такие различия во многом определяют взаимодействие всех прочих полей с полями, генерируемыми таким разломом.

За время формирования вида Homo sapiens его представители большую часть жизни проводили под открытым небом. Человек сформировался в режиме определенной энергетической "подпитки" из космического пространства, от Солнца и от геомагнитного поля Земли. Сложилась ситуация своеобразного гомеостаза человека во взаимодействии с ЭМП различной природы.

Урбанизация жизни и изменение характера работы привели к тому, что человек значительную часть своего времени стал проводить в замкнутых пространствах, экранирующих его от естественных электромагнитных полей. Возможно, в этом и заключается проблема дискомфорта и угнетенного состояния отдельных людей, значительное время лишенных воздействия столь привычных человеку полей. Возможно, что в силу этого обстоятельства некоторые ослабленные люди испытывают непреодолимую тягу к экранам телевизоров или дисплеям персональных компьютеров, подпитыва-ясь от них электромагнитной энергией. Эта проблема столь же актуальна, как и задача определения доз вредного воздействия ЭМП на живые организмы, в том числе и на человека, учитывая, что энергия, выделяемая в радиодиапазоне в результате деятельности человека, стала сравнимой с энергией Солнца в видимом диапазоне спектра (Горбачев, 2003).

Совокупность внешних воздействий прежде всего осуществляется в такой среде, как воздух, которым мы дышим. Как известно, в воздухе постоянно присутствуют различные органические молекулы, в том числе и болезнетворные. Более того, как показали биологические исследования (Чет-верин, Четверина, 2002; Спирин, 2004), в воздухе биологических лабораторий присутствуют различные гены и их фрагменты, и этим воздухом люди дышат. Учитывая высокую способность биологических микрообъектов реагировать на изменение состояния окружающей среды, можно полагать, что в "благоприятных" условиях насыщения воздушной среды различного вида ЭМИ и звуковыми воздействиями, особенно в насыщенном аэрозолями воздухе мега- и технополисов, могут достаточно быстро проходить мутации микроорганизмов или аномальное разрастание в массе их определенных видов. Синергетическое сочетание многих из этих факторов может быть особенно благоприятным для одних групп микроорганизмов и не быть таковым для других. И это одна из современных проблем синергетики среды обитания человека.

Особое значение в плане проводимого исследования приобретает проблема нелинейного воздействия на человека, когда существенно нарушается принцип суперпозиции, а именно, на первый взгляд, весьма слабые воздействия вызывают очень сильную ответную реакцию организма. По всей вероятности, суть данного эффекта лежит не в биохимической или биомолекулярной сфере, а скорее носит информационный характер, когда в "памяти" клетки на сенсорном уровне есть запись о негативном воздействии данного явления на человеческий организм.

Судя по статистике, огромное число людей, особенно в мегаполисах, подвержено стрессу. Одной из причин стресса считается урбанизация, следствием которой бывают сильные эмоциональные нагрузки, повы-

шенный ритм жизнедеятельности, нарушение сна и т. д. Стресс проявляется в трех формах: явной - психические расстройства, нарушение психореакций на окружающую среду и события; так называемой дискретной — периодическое проявление нарушений психической деятельности на фоне нереального состояния; скрытой - постоянная неосознанная тревога, чувство неуверенности, вера в мистические "чудеса" и т. д. Не исключая влияния других факторов, следует обратить самое пристальное внимание на синергетические внешние воздействия - ЭМИ и звуковой фактор, которые могут порождать стрессовые состояния. Общеизвестно влияние инфраволн, ультразвука и монотонного шума на состояние психики. Один из авторов был свидетелем угнетенного, раздражительного состояния сотрудников экспедиции в Муго-джарах, где 10 мес в году дул ветер, но когда ветер прекращался, люди становились доброжелательнее, пропадала раздражительность. Постоянный гул автотранспорта вдоль городских магистралей в сочетании с инфразвуком является одним из факторов стресса. Раздражающий эффект сверхмощных звуковых воздействий (дискотеки и концерты поп-музыки) является общепризнанным. В этом плане остаются совершенно не изученными вопросы о том, какие именно электромагнитные излучения могут быть причиной стресса, в каких дозах, для каких типов людей, возрастных категорий, сенсорных восприятий и т. д. Или, как справедливо указывает Ю.В. На-точин (2004), "одна и та же болезнь, одно и то же нарушение функций внешне могут иметь неодинаковые проявления у разных пациентов - каждый болеет по-своему". В свете работ, выполненных Н.Ф. Благовещенской с соавторами (1977), стало очевидно, что под действием мощных электромагнитных или тепловых волн от земной поверхности к ионосфере в последней возникают пространственно-временные структуры, генерирующие свои ЭМИ, фиксируемые, в частности, в радиодиапазоне. Это достижение в свое время было отмечено Американским геофизическим союзом, присудившим Н. Благовещенской Большую золотую медаль. Именно после этих работ в США начались интенсивные исследования по изучению реакции ионосферы на направленные на нее высокоэнергетические кратковременные "удары", что, в частности, привело к созданию мощного исследовательского комплекса на Аляске. По логике этих исследований, речь может идти о создании принципиально нового ионосферного оружия, ибо тот, кто научится формировать в ионосфере над определенными районами Земли, особенно мегаполисами, военными объектами и т. д., пространственно-временные ЭМИ-структуры с заданными диапазонами электромагнитных излучений, направленных к поверхности Земли, в итоге может управлять развитием в местах скопления людей массовых стрессов, депрессий, панических состояний и т. д. Одна из стратегических задач фундаментальных наук России -предугадать направление подобных исследований в США, разработать меры распознавания таких воздействий и противодействия им.

Общепризнанное негативное влияние инфраволн на человека и другие организмы диктует создание в пределах крупных городов, особенно мегаполисов, специальных служб по фиксации инфраволн, их силовой идентификации, особенно с выделением диапазонов, наиболее болезненных для человеческого организма.

Как подчеркивалось выше, природа инфраволн может быть самой различной. Одновременная фиксация микросейсм и инфраволн внутри Евроазиатского континента (Иркутск, Ташкент, Екатеринбург) убедительно показала, что они порождаются мощными океаническими штормами, удаленными от точек фиксации на несколько тысяч километров (Ponomaryov et al., 1998), хотя следует признать, что наиболее сильное воздействие производят значительные воздушные массы (циклоны) и локальные технические источники инфраволн. Особенно болезненно восприятие нескольких видов инфраволн из разных источников с разными частотными характеристиками.

Синергетические эффекты при взаимодействии космических, техногенных и геологических полей могут обусловить различные формы генерации и распространения волн:

-пространственно-временные диссипативные структуры - генераторы электромагнитных волн и физических полей;

-распространяющиеся возмущения в виде импульсов энергии;

-стоячие волны;

-квазистохастические волны;

-дискретные автономные источники импульсной активности.

В случае резонанса волновых характеристик этих систем с таковыми у человека (частота колебаний или длины волн) не только происходит нарушение общего состояния человека как стационарной системы, стремящейся сохранить состояние гомеостаза, но может проявиться у ослабленного организма "наркотическая" потребность в повседневной энергетической подпитке от внешнего источника.

Таким образом, с позиции самоорганизации воздействие полей на человека нужно рассматривать как один из факторов выведения его из состояния гомеостаза. Реакция человеческого организма - это стремление сохранить состояние гомеостаза, жестко запрограммированное за миллионы лет его развития. Исходя из этого следует признать, что по отношению к ГМП человек является жестко запрограммированной консервативной системой с крайне незначительным "коридором" отклонения от состояния гомеостаза, намного меньшим, чем по отношению к другим жизненно важным параметрам, например концентрации кислорода в воздухе.

Анализ опубликованных работ по определению воздействия электромагнитных и низкочастотных колебаний (инфразвук) на человеческий организм приводит к одному убийственному выводу: все эти воздействия в различной степени влияют на кору головного мозга, высшую нервную деятельность, разрушают имунную систему человека, особенно у детей.

В результате комплекса исследований возможна постановка вопроса о квотировании источников электромагнитной энергии в пределах мега- и технополисов для тех случаев, когда суммарная напряженность электромагнитных полей различной природы и прочих низкочастотных воздействий (например инфразвука) достигает критических уровней.

Выполненный нами анализ по синергетике среды обитания человека направлен для ознакомления с данной проблемой в первую очередь тем чиновникам, которые принимают долгосрочные решения на государственном уровне, ибо незнание полученных разными группами ученых данных по этой проблеме чревато непоправимыми бедами для всего человечества.

На второй конференции ООН по окружающей среде и развитию в 1992 г. Станислав Лем сказал пророческие слова: "Необходимость выбора между цивилизацией как глобальным правлением знатоков-экспертов и цивилизацией как правлением политических лидеров, демагогически обещающих «все», а на деле не способных дать почти ничего, будет все более острой". Далее С. Лем приходит к выводу, что общая тенденция такова, что "возрастающей сложности государственных, социальных, технических, наконец, глобальных проблем сопутствует явное **снижение уровня компетентности правящих элит"** (Коптюг, 1992; Кондратьев, 1993). Спустя 5 лет Р. Уэлфорд заключает: "За последние несколько десятилетий почти каждая экосистема и первичная культура на Земле были повреждены, а во многих случаях полностью разрушены агрессивными человеческими существами" (Welford, 1997).

Хоменко А.П., Елисеев С.В., Засядко А.А., УДК 62.031

ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

В настоящее время главным направлением развития передовых стран является вовлечение результатов научно-технического прогресса в интенсификацию общественного производства. В связи с этим, возникает качественно новый этап развития экономики, который определяется ныне как становление «новой экономики» или «экономики знаний». Накопленный потенциал научно-технических достижений превращается в движущую силу преобразований материально-технического фундамента общества, где приоритетным фактором развития становятся «интеллектуальные» ресурсы.

Как никогда воспрошенными практикой оказываются решения, которые продиктованы арсеналом возможностей методов и средств информатизации и автоматизации. Задачи системного анализа, обработки информации и управления накладывают свой отпечаток на тенденции развития всех отраслей техники. Однако, их решения до сих пор не всегда и не в полной мере обнаруживаются результативными в условиях необходимости обеспечения высокого качества, надежности и производительности машин, механизмов, приборов, оборудования, агрегатов и сооружений. Это порождает сложные проблемы, связанные с необходимостью развития новых подходов, способных успешно гарантировать эффективность их проектирования, производства и эксплуатации в условиях современных требований к перевооружению технической базы производства.

Тенденция увеличения энергетической отдачи машин и механизмов при снижении их материалоемкости с одновременным наращиванием ресурсов интеллектуализации обнажает одну из таких важных проблем как создание нового поколения машин и механизмов с учетом их динамических (вибрационных) свойств. В отличие от классической теории машин и механизмов возникающие новые постановки исследовательских задач определяются возрастающим значением решений в сфере информационных технологий и автоматизации процессов управления. В условиях необходимости создания технических объектов, отвечающих современным требованиям к их динамическим характеристикам, сегодня рождается и «встает на ноги» новое направление науки и практики, называемое «мехатроникой». В свою очередь, традиционные для этого направления задачи автоматизации движений машин и механизмов должны получить «свежее звучание» в связи с рядом актуальных проблем последнего времени.

Выявилась более глубокая системная сущность разностороннего динамического взаимодействия объектов управления и их управляющих устройств. Представления об этих воздействиях, только как о некоторых сигналах, т.е. влияниях одностороннего вида, широко употребляемых в классической теории управления, не всегда являются в целом оправданными. Во многих случаях в системах мехатроники на практике обнаруживаются эффекты динамики, которые выходят за рамки информационной природы и выражаются как механические характеристики. Такие важные двухсторонние взаимодействия не учитываются в алгоритмах управления при обосновании возможностей их технической реализации и в целом оказываются не задействованными в рациональных построениях этих систем.

Главное внимание в этих аспектах уделяется функционированию систем мехатроники в условиях вибрации, которая, как правило, обнаруживается нежелательной с технической точки зрения. Порождают данную вибрацию многочисленные явления, которые су-

ществуют практически в каждой машине и любом механизме из-за наличия неуравновешенности масс и инерционных сил, периодического характера рабочих нагрузок и изменений конфигурации, электромагнитной нестабильности, пульсации жидкостей и газов, многих других причин в зависимости от их принципа устройства и конструкции.

В этих условиях попытки построения эффективных систем мехатроники наталкиваются на специфичные явления несовершенства качества их работы. Вследствие возбуждения вибрации как в самих объектах, так и со стороны других объектов окружающей среды, наблюдаются отклонения и нарушения законов движения, приводящие к неустойчивости процессов управления и отказам систем. За счет воздействия такой вибрации может происходить перераспределение усилий между отдельными звеньями систем, которое способно порождать, не только значительное нештатное возрастание, но существенное нерасчетное влияние динамических нагрузок, влекущие разрушения элементов и самих объектов. На практике встречается множество других случаев негативного проявления вибрации; возникают и новые актуальные задачи, требующие более полного проникновения в свойства механических колебательных систем. Характеристики, отражающие влияние вибрации на объекты, становятся предметом рассмотрения условий динамических преобразований в системах. Их результаты, продиктованные задачами анализа, становятся более адекватными природе мехатронных систем и определяются задачами синтеза специальных машин и механизмов с требуемыми характеристиками объектов защиты. Вместе с тем, подобного рода задачи, направленные на построение соответствующих систем, обретают, наряду с использованием управленческих подходов, характер, свойственный подходам механики к снижению виброактивности объектов. Именно, этот симбиоз подходов обеспечивает новизну в получении более рациональных решений при создании конструкций машин и механизмов, ориентированных на инженерную практику.

Традиционно структура научно-технических и инженерных знаний в области снижения вибрации разнообразных объектов защиты представляет следующий комплекс задач.

1). Определение источников виброактивности и установление уровней вибровозбуждения объектов. Решения этих вопросов находится в связи с задачами виброметрии и, в известной степени, вибродиагностики.

2). Моделирование вибрационных состояний объектов защиты и получение оценок влияния на них вибровозбуждений с учетом вибронормирования. Это касается решений задач виброанализа и, в известной мере — виброиспытаний.

3). Обеспечение снижения виброактивности или уровней вибросостояний. Эти вопросы определяются задачами виброзащиты, а их решения в общем случае опираются на результаты всех предыдущих задач.

Актуальность задач оценки уменьшения вибрации объектов. Оценка вибрационного состояния различных объектов техники, стоящая в основе ряда передовых подходов к их конструированию и изготовлению, является предметом постоянного внимания со стороны инженерного корпуса. Такими объектами в качестве некоторых источников вибрации выступают машины, механизмы, оборудование, приборы, сооружения, многое иное, что полезно используется человечеством для обеспечения производства и осуществления технологических процессов в самом широком смысле употребления всех этих понятий, как необходимого технического фундамента преобразующей деятельности любой направленности. Вместе с тем, оценка вибрационного состояния, рассматриваемая в качестве этапа жизненного цикла изделий техники любого назначения, должна быть направлена на обеспечение этого требования, в контексте реализации объектов.

Современные технические объекты, номенклатура которых в настоящее время является разнообразной, имеют различные вибрационные состояния, неотъемлемые от принципа их функционирования или же обусловленные спецификой их поведения. В качестве источников такого рода состояний выступают, с одной стороны, многие несовершенства объектов по природе их конструктивных и эксплуатационных характеристик. С другой стороны, специальные вибрации и удары формируются в объектах для намеренного осуществления рабочих действий, обладающих особыми характеристиками. Все эти многочисленные источники вибрации порождают влияние друг на друга за счет всегда сопутствующих работе технических объектов в большей или меньшей мере естественных процессов

передачи динамических нагрузок в окружающие среды. Распространение вибрации от нескольких источников особенно важно для технологических систем, что приводит к многократному воспроизведению их взаимных вибрационных действий. В обоих случаях функционирование объектов техники приходится контролировать, поскольку происходят разнообразные эффекты такого рода проявления своих и влияния наведенных вибрационных состояний, что может часто и крайне негативно сказываться на собственной работе и поведении других объектов, прежде всего, человека. В связи с этим остро возникает актуальная проблема ограничения, в первую очередь, уровня вибрационного состояния объектов, которая требуется, как при введении в строй ранее разработанных, так и при создании новых объектов прогрессивной техники.

Современная установка на контроль и ограничение уровней вибрации объектов, отражающих их динамическое состояние, следовательно, на процессы качества и успешности функционирования этих объектов является задачей высокой научной и технической значимости.

В подтверждение этого можно указать на существование обязательств по применению во всех развитых странах обширного слоя специальных документов, которыми закрепляются передовые исследовательские и технологические достижения. Речь идет, в первую очередь, о стандартах, которыми регламентируются обоснованные и установленные нормы в областях измерения, расчетной и испытательской оценки, обеспечения контроля или ограничения вибрационных состояний.

В соответствии ГОСТ 24346-80 «Вибрация. Термины и определения» понятие вибрации означает «движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его (это движение) скалярных величин. Механические колебания — это колебания значений кинематической или динамической величины, характеризующей механическую систему» [1]. Несмотря на практическую равнозначность терминов, сложившееся словоупотребление соотносит термин вибрация больше с характерными движениями, обусловленными работой машин, механизмов, агрегатов и т.п. При этом вибрацией обычно называют наиболее свойственный технике и ввиду этого распространенный вид механических колебаний. Часто условная специфика этого термина заставляет говорить о вибрации в случаях относительно малых амплитуд и немалых частот колебаний [2]. Применение термина механические колебания связывают с определенным абстрагированием от технизированного понятия, специфика использования которого больше связывается с математическими или физическими интерпретациями теории колебаний, т.е. моделями процессов, отвечающих периодическим или тяготеющим к ним движениям. Источником вибрации выступает практически всякая машина, механизм, агрегат. Источником вибрации и ударов может быть окружающая среда для транспортных машин или сооружений, подвергающихся сейсмонагрузкам. При проектировании, изготовлении и эксплуатации техники, как правило, исходят из предпосылок, что вибрации являются вредным фактором, как для самой машины, механизма, агрегата, так и всем объектам окружающей среды — приборам, оборудованию, сооружениям и человеку из обслуживающих операторов или находящемуся внутри и вблизи производственного процесса. В ряде случаев вибрации или удары создают специально для использования в технологических процессах. Однако, эти источники, оказываясь полезными в производстве, не перестает быть также вредными для конструкций тех же машины, механизма, агрегата и человека. Поэтому в технике особое значение приобретают специальные методы и средства уменьшения вибрации, совокупность которых принято называть виброзащитой [3]. Данный термин является наиболее распространенной формой определения, за которым на практике обычно закрепились не только случаи защиты от вибрации, но и другие случаи нагружения объектов защиты, начиная от воздействия ударов, заканчивая воздействиями, так называемых, линейных ускорений [4]. Термин виброзащита обязан своему сложившемуся обобщению тем, что независимо от причин во всех случаях нагружения объектов, по-существу, индуцируются их вибрации. Нельзя не согласиться со словоупотреблением в отношении потребности защиты, именно, от вибрации, если, тем более, применяются конструктивно одинаковые методы и средства уменьшения их при различных видах источников возбуждения. Но опыт показывает также уместным использование, наряду названием виброзащита, терминов по отдельности

ударозащита, виброударозащита и т.п. При этом их различия определяются дифференциацией случаев решения задач защиты, где условия и когда итоги оценки динамических состояний объектов соответственно индивидуальны [3].

В обеспечение виброзащиты должна быть задействована, так называемая, вибрационная техника (в широком смысле понятия), которая подразумевает «совокупность методов и средств возбуждения, полезного применения и измерения вибрации, вибрационной диагностики, вибрационной защиты и вибрационных испытаний» [1]. В связи с достаточно развитым в настоящее время потенциалом этой вибрационной техники (вибротехники), целесообразно далее рассмотреть вопросы её современного состояния в различных направлениях, сформулированных по определению.

Сначала представляется необходимым определить вибрационные процессы в производственных условиях, где осуществляется работа машин, механизмов и агрегатов, возбуждающих или продуцирующих вибронагрузки (настоящая статья, 1 часть). Далее раскрывается положение в сфере виброметрии, посвященной измерению вибрации, которая позволяет по полученным результатам проводить виброконтроль уровней или осуществлять вибродиагностику в распознавание состояний объектов (часть 2 — следующая публикация). Наконец, обзорно будут изложены известные подходы и обсуждено содержание основных достижений в области вибрационной защиты (часть 3 в продолжение настоящей статьи). Как известно, результаты разработок систем виброзащиты могут на практике увязываться с задействованием сфер виброметрии и вибрационных испытаний (в конкретных случаях реализаций) при оценках вибрационных состояний объектов защиты, а также могут подлежать виброконтролю или вибродиагностике (по необходимости) с позиций обеспечения их качества работы. Вместе с тем, в настоящей статье (часть 1) указывается на положение о нормировании вибрации, позволяющее выполнять конкретную оценку уровней вибрационного состояния объектов, закладываемых в основу построения современных систем виброзащиты.

Вибрационные процессы. Вибрационным процессам и механическим колебаниям в технике посвящена обширная научно-техническая литература. Наиболее полно эти результаты изложены в систематизированных изданиях: популярный шеститомный справочник «Вибрации в технике» [5]; известный трехтомный справочник «Прочность, устойчивость, колебания» [6]; в ряде разделов энциклопедии «Машиностроение. Том I-3. «Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин» в двух книгах [7]; в справочнике мировой известности «Harris* Shock and Vibration Handbook» [4] и др. Фундаментальные труды по этим вопросам представлены в настольных для специалистов отечественных книгах, указываемый список авторов которых далеко не полон: Андронов А..А., Артоболевский И.И., Бабаков И.М., Бидерман В.Л., Биргер И.А., Бишоп Э.Р.Д., Блехман И.И., Боголюбов Н.Н., Болотин В.В., Булгаков Б.В., Бутенин Н.В., Витт А.А., Вайнберг Д.В., Вульфсон И.И., Ганиев Р. Ф., Генкин М.Д., Ден-Гартог Дж.П., Диментберг М.Ф., Елисеев С.В., Журавлев В.Ф., Иориш Ю.И., Климов Д.М., Клюев В.В., Колесников К.С., Коловский М.З., Кононенко В.О., Кренделл С., Лавендел Э.Э., Ларин В.Б., Магнус К., Малкин И.Г., Мандельштам Л.И., Митропольский Ю.А., Морзе И.Е., Неймарк Ю.И., Пальмов В.А., Пановко Я.Г., Первозванский А.А., Писаренко Г.С., Писаренко Н.Г., Светлицкий В.А., Синев А.В., Стрелков С.П., Тимошенко С.П., Троицкий В.А., Фрадков А.Л., Фролов К.В., Фуфаев Н.А., Хайкин С.З., Хаяси Т., Хвингия М.В., Хинкл Р.Т., Цзе Ф.С., Челомей В.Н., Черноусько Ф.Л. и многие другие.

Багаж полученных научных и инженерных результатов по механическим колебаниями и вибрационным процессам столь велик, что сделать содержательный обзор литературы в целом не представляется возможным. Однако, ряд систематизированных сведений следует привести, что позволит очертить конфигурацию обсуждаемых вопросов, касающихся известных решений многоаспектных проблем современной виброзащиты технических объектов. При этом будем исходить из возможностей описания положения дел в области вибрационных процессов, с одной стороны, по результатам теории колебаний, с другой стороны, по материалам стандартов, в которых принято закреплять известный опыт практики этих направлений.

Современное производство, в широком смысле, представляют систему отраслей техники или специализированных видов технологий, призванных выпускать определенную продукцию и услуги для потребления в общес-

тве. Подавляющее большинство вибрационных процессов имеет место в отраслях промышленности и транспорта. Значительная часть выполняемых там работ состоит из обработки исходных материалов и превращения их в готовые изделия с помощью техники, энергии, труда и информации, которые в своей совокупности образуют рабочие или технологические процессы. Часть этих процессов являются транспортными, выполняющих передачу материалов к местам переработки и потребления. Многие рабочие процессы производства обеспечиваются за счет механических движений. Меньшая часть этих движений осуществляется вручную, посредством включения человека в рабочие процессы. Большая часть рабочих процессов, связанных с осуществлением механических движений, производится с помощью машин.

«Машиной» принято называть устройство, выполняющее механические движения для преобразования энергии, материалов и информации с целью замены или облегчения физического и умственного труда человека [8]. Вид рабочего процесса разделяет машины на технологические, транспортные, энергетические, информационные. Наряду с машинами в производстве участвуют «аппараты», которые не связаны напрямую с механическими процессами (например, химические). Однако и в аппаратах происходят явления механических движений, отвечающие процессам преобразования и перемещения материалов. Таким образом, машины, а также в общем случае и аппараты, являются сложными механическими системами, способными под действием динамических нагрузок совершать в определенных условиях колебания. Их колебательные или вибрационные процессы, по-существу, зависят от принципа устройства и особенностей реализации их конструкции. Существующие производственные машины, несмотря на их разнообразие, имеют однотипный состав, включающий: двигатель, рабочий орган, систему управления движением. Эти функциональные части машины не приходят в действие без механизмов. Про «механизмом» принято понимать систему тел, предназначенную для преобразования движения одного или нескольких твердых тел (обычно — двигателя) в требуемые движения других твердых тел (обычно — рабочих органов) [8]. В случае нескольких функциональных частей одновременно нередко говорят о наличии «машинного агрегата» [9].

В теории механизмов и машин (в контексте данного выше определения механизма) под твердыми телами понимаются как абсолютно твердые, так и деформируемые и гибкие тела [8, 10-12]. Вместе с тем, принято различать гидравлический механизм, в котором преобразование движения происходит посредством твердых и жидких тел; пневматический механизм, в котором преобразование движения происходит посредством твердых и газообразных тел [8]. Употребляют также электромеханизмы [11]. В составе механизмов выделяют приводы, которые определяются системой взаимосвязанных устройств для приведения в движение одного или нескольких твердых тел из состава машины или механизма. В свою очередь, приводы в общем случае состоят из двигателя, насоса (для случаев гидро и пневмомеханизмов), передаточных механизмов и управляющих органов. Однако, двигатели и насосы (для гидро и пневмомеханизмов) по определению называют также машинами [8]. Поэтому целесообразно, не выделяя отдельно термины механизма и машины, поскольку каждые из них содержат части, преобразующие, так или иначе, свою энергию в механические движения, сосредоточиться на понятиях их как сложных механических систем. В общем случае такого рода комплексные, составные системы, включающие элементы самой разнообразной природы: гидромеханические, пневмомеханические, электромеханические и многие другие, какие угодно иные, становятся в современной технике наиболее актуальными. В теории механизмов и машин в качестве основного предмета внимания выступали только чисто механические системы, колебательная механика которых порождалась, наличием в их действующем составе, помимо инерционных, прежде всего, упругих элементов [13]. В настоящее же время начинает преобладать внимание к вибрационным процессам, причинами которых оказываются намного более сложные и разнообразные явления, свойственные поведению динамических систем с гибридной или смешанной природой происхождения.

Рассмотрим систему в качестве некоторой совокупности объектов в виде материальных точек или твердых тел (абсолютно неподатливых, упругих или деформируемых), которые взаимодействуют между собой по определен-

ному закону (механики, электромагнетизма и т.д.) и также испытывают некоторую нагрузку от окружающей среды. Состояние такой системы в каждый момент времени — t будет определяться некоторым набором параметров. Основная задача теории колебаний обычно заключается в том, чтобы описать движение системы в некотором известном классе процессов, позволяющее отыскивать (прогнозировать или предсказывать) эволюцию - движения системы во времени. При этом известно, что должны быть заданы набор начальных условий движения (параметры начального состояния: положение и скорость системы, т.е. её траектория в момент времени $t = 0$) и внешнее воздействие (нагрузка) на систему [2]. Эта прямая задача имеет название - второй задачи динамики [14]. В теории колебаний решается и обратная задача (первая задача динамики [14]), заключающаяся в том, чтобы отыскивать приложенные к системе возбуждающие силы, отвечающие заданным движениям в виде известных функций координат системы от времени.

Пусть имеет место процесс движения во времени — t рассматриваемой системы, который характеризуется определяющим параметром u (t). Тогда изменение состояния системы по этому параметру может быть в зависимости от условий задачи приобретать монотонный, немонотонный и периодический немонотонный (абсолютный или относительный) характер изменения на ограниченном ($t = 0$, t) отрезке времени (рис.1).

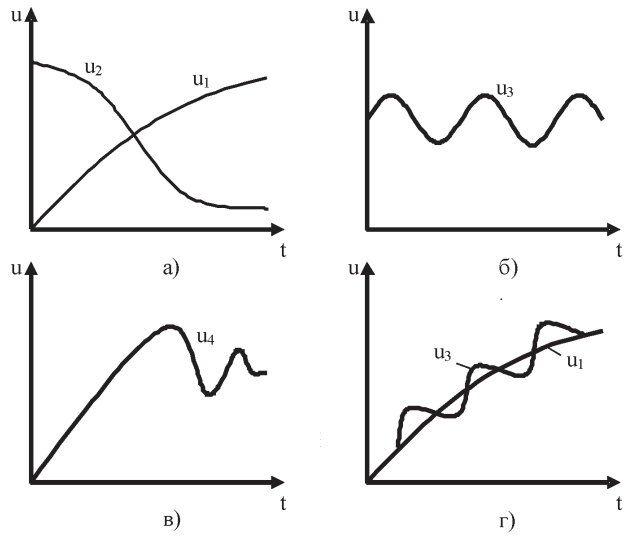


Рис. 1. Изменение определяющего параметра состояния системы.

Монотонная функция — это функция, приращение которой не меняет знака, т.е всегда неотрицательная либо неположительная, например для $u_1(t)$ или $u_2(t)$ (на рис. 1.а) и т.п. В отличие от строго монотонной функции, когда приращение не равняется нулю, противоположные случаи $u_3(t)$ и $u_4(t)$ могут быть названы существенно немонотонными (рис. 1.б, в).

Процесс изменения параметра (скалярной величины, компонента векторной или тензорной), обусловленный возрастанием и убыванием своих значений - повторно, поочередно и многократно принято называть колебательным процессом, а сам параметр — колеблющейся величиной [15]. Можно говорить о колебаниях системы в таких характерных случаях её поведения, которые определяются процессами регулярных немонотонных приращений функций, описывающих определяющие параметры (рис 1.б, в). В случае (на рис. 1. г) показано, что величина $u_3(t)$ является колеблющейся величиной в двояком смысле, как в абсолютном (аналогично поведению кривой $u_3(t)$ на рис. 1.б), так и в относительном (подобно отклонению $u_3(t)$ от кривой $u_1(t)$ на рис. 1.а), поскольку величина разности $u_3(t) - u_1(t)$ также представляется равнозначно колеблющейся величиной.

Поскольку в системе имеется, как правило, несколько параметров, то говорят о системе, что она совершает колебания, когда все её параметры или наиболее существенные или один определяющий параметр выступают в виде колеблющихся величин. В связи с невозможностью точно указать четкую границу, отделяющую колебания от неколебательных движений, принято считать, что система является колебательной при определенных условиях. Хотя для любой системы можно указать такое воздействие, когда она будет испытывать колебательное движение, полагают систему колебательной, если она способна совершать колебания при отсутствии источника возбуждения от внешнего воздействия (без поступления энергии извне), т.е. находится в режиме свободных колебаний (за счет заранее накопленной энергии) [2, 15].

Вибрационные процессы в современной технике представляют собой сложные механические колебания с множеством разновидностей их поведения. Определение этих поведений опирается на свойства уравнения, которое в операторной форме выражает связь между параметрами состояния системы - u (t) и пара-

метрами внешнего воздействия на систему - q (t):

$$Lu = q, \qquad (1)$$

где L — оператор системы, представляющий уравнения движения и условия однозначного описания поведения системы в векторном представлении величин u (t) и q (t).

Для механических систем операторное уравнение (1), как правило, сводится к совокупности некоторых дифференциальных уравнений с начальными (в сосредоточенных системах) и граничными или краевыми (в распределенных системах) условиями, а также некоторых уравнений связей - дополнительных соотношений между переменными в системах.

Систематизация механических колебаний обычно проводится с позиций рассматриваемых в этих областях исследований механико-математических моделей [2,12,16-18 и др.]. Ниже их классификация представлена в качестве некоторых условно-типизированных схем, отражающих основные известные виды колебательных систем (рис. 2) и колебательных процессов (рис. 3).

Одним из важнейших признаков такой систематизации является число степеней свободы системы, которое определяется как число независимых, допускающих выбор по произволу вариаций координат системы [14]. Это понятие тесно связано с определением возможных перемещений, имеющихся в несвободной (от связей, ограничивающих движения) механической системе под действием приложенных сил. Если взаимная связь между элементами системы такова, что для однозначного установления её конфигурации (положение всех точек системы в пространстве) достаточно только одна пространственная координата, то такая система имеет одну степень свободы. В механике число выбор числа степеней свободы нередко, а в теории колебаний — часто, зависит от допустимого уровня идеализа-

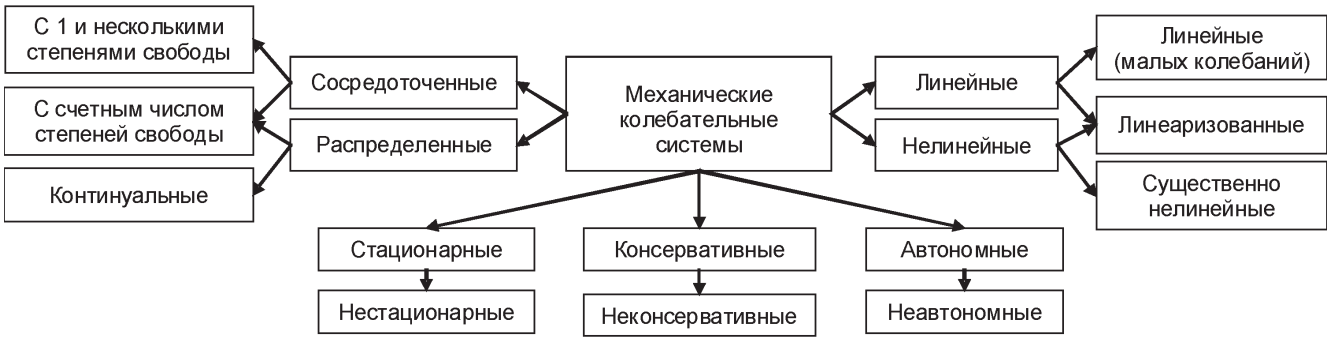


Рис. 2. Классификационная схема видов колебательных систем.

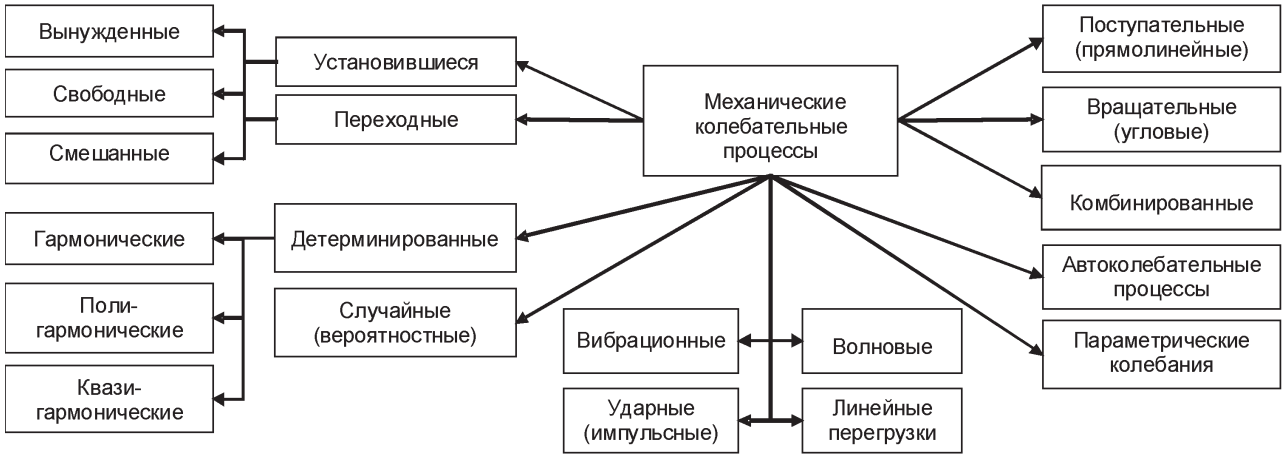


Рис. 3. Классификационная схема видов колебательных процессов.

ции и задач исследования реальных систем. Если интересующий фактор является значимым, то соответствующая модель и выбирается за основу обоснований.

В связи с этим различают системы с бесконечным и конечным числом степеней свободы. В последнем случае системы называют сосредоточенными (системы с одной или несколькими степенями свободы). В первом случае системы могут быть представлены с континуальным множеством степеней свободы, называемые распределенными (континуальными) системами, или со счетным числом степеней свободы. Математически сосредоточенные системы описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, распределенные системы - дифференциальными уравнениями в частных производных, а счетные — бесконечной системой обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющих получать их приближенную трактовку как систем одновременно с бесконечным или конечным числом степеней свободы.

Одним из наиболее актуальных признаков систематизации является известный принцип суперпозиции, справедливость применения которого к математическому описанию позволяет указать на представление их в виде линейных или нелинейных систем. По природе всякая система, по—существу, есть нелинейная. Если удается найти подходящие модельные условия, т.е. приближенности оператора L выражения (1) к линеаризованной форме, то система оказывается линейной, например, в случае малости её колебаний. Математическая формулировка этих задач динамики приводит к линейным дифференциальным уравнениям, обыкновенным или в частных производных. В случае невозможности линеаризации по проявлению качественно особых характеристик систем имеют место существенно - нелинейные системы. Признак линейности или нелинейности, как впрочем, и некоторые другие, ниже рассматриваемые свойства систем, в частности, стационарности и нестационарности, автономности и неавтономности, консервативности и неконсервативности реальных систем это вопрос о пригодности различных способов идеализации к исследовательским целям и условиям [18].

По признаку изменяемости свойств во времени на некотором интервале системы разделяются на стационарные и нестационарные, которые, в свою очередь, описываются дифференциальными уравнениями с постоянными или переменными коэффициентами (параметрами).

В автономных системах колебания происходят за счет только внутренних источников энергии либо энергии начального возмущения. Неавтономные системы совершают свои колебания с поступлением энергии непосредственно во время движений от внешних источников, располагающихся в окружающей среде.

Признак консервативности определяется постоянством полной механической энергии (суммы кинематической и потенциальной) системы при колебаниях. Вместе с тем, неконсервативные системы в случае убывания этой энергии называют диссипативными. В автоколебательных системах возникают явления самовозбуждения колебаний при условии их стационарности и консервативности. При этом такого рода автоколебания в системе возникают вследствие поступления энергии от наличия в её составе источника неколебательной природы посредством движений самой системы.

Классификационная схема видов колебательных процессов (рис. 3) определяет в системах различного рода установившиеся или переходные движения, связанные с характеристиками действия в системе внешнего источника энергии — нагрузки возмущения или возбуждения. Вынужденные колебания представляют собой установившиеся процессы, вызываемые периодическим воздействием нагрузки извне так, что отвечают проявлениям свойств систем в режимах неавтономности. Свободные колебания, наоборот, относятся к свойствам систем в режимах автономности. Свободные колебания, выступая коренной характеристикой колебательных систем по их определению, вызываются некоторыми начальными условиями движения за счет придания системе в начальный момент времени предварительных перемещений и/или скоростей (иного источника энергии системы при этом не имеется). В условиях переходных процессов, которые обусловливаются приложением или отключением внешних нагрузок, причем не обязательно в качестве лишь периодических возмущений, происходят «смешанные» процессы так, что некоторое время одновременно имеют место свободные и вынужденные колебания, постепенно уступая по-

следним. Решения системы, описываемой обыкновенными дифференциальными уравнениями, строятся для смешанных колебаний как общего случая суммой общего решения соответствующего однородного уравнения, касающейся свободных колебаний, и частного решения неоднородного уравнения, отражающего вынужденные колебания [2].

В качестве возмущений колебательных систем, вызывающих различные установившиеся и/или переходные движения, рассматривается ряд типовых случаев представления процессов: вибрационные, волновые, ударные (импульсные, в частном случае - ступенчатые) и, так называемые, линейные перегрузки (ускорения движений в переходных режимах работы).

Вибрационные процессы — это наиболее распространенный в технике вид движений, свойственных колебательным системам, которыми отражают воздействия на данные объекты со стороны других, однородных этим же объектам, источников возмущения (одного или нескольких одновременно). На рис. 4 (а-ж) представлены характерные виды вибрационных процессов.

Простейшим видом вибрации является «гармоническое колебание», которое в виде функции времени выражается синусом и / или косинусом (рис. 4.а). В механике такого рода представления движений выступают, как правило, преобладающими ввиду классической элементарности форм их описания в математике. Однако, в технике они встречаются намного реже, где чаще имеют место «квазигармонические колебания» в виде вибрации близкой к гармонической с непрерывным изменением частоты колебаний (рис. 4.б). Но большая часть колебаний оказывается в форме «искаженной синусоиды» (рис. 4. в, г, д) или «полигармонической», при наличии многочастотности вибрации, представляющейся в виде суммы двух или нескольких гармоник. Наряду с детерминированными колебаниями, которые выражаются моделями с однозначными величинами параметров движения, в реальных системах имеются флуктуации параметров, как движения, так и возмущений. Эти неизбежные вероятностные отклонения состояний систем, приводящие к множественным реализациям движений, порождают случайные колебания.

Движения, которые вызываются переменным внешним воздействием с отклонениями от регулярных (периодических) будут вызывать случайные вынужденные колебания. В случае изменений во времени параметров системы (одного или нескольких) происходят параметрические колебания. Такие колебания возможны лишь в нестационарных системах. Автоколебания или самовозбуждающиеся колебания принадлежат стационарным, консер-

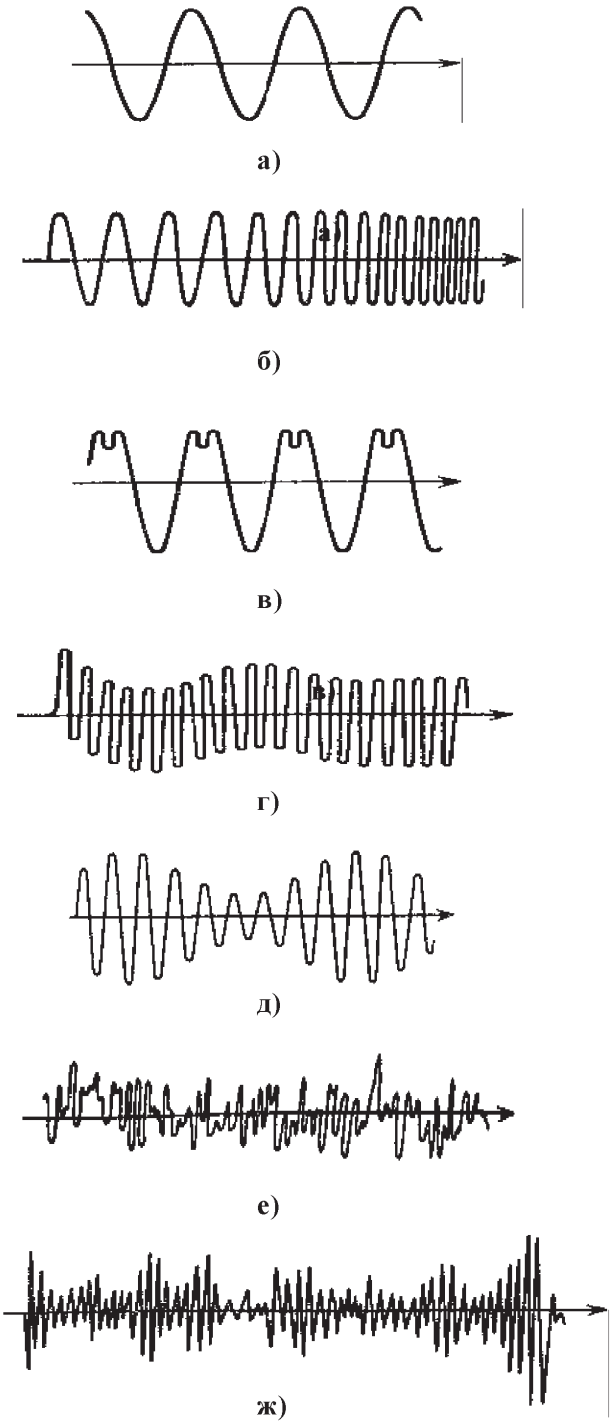


Рис. 4. Виды вибрационных процессов.

вативным системам и существенно определяются нелинейностью их свойств.

Вследствие наличия достаточно быстрых флуктуаций по сравнению с регулярным динамическим процессом можно представить существование скачкообразных изменений состояния. В связи с этим движения подчиняются законам статистики, перестают быть «монохроматичными» и оказываются лишь приблизительно периодическими. На практике их обычно наблюдают в качестве «широкополосной» (рис. 4.е) или «узкополосной» (рис. 4.ж) вибрации [17]. Принципом деления случайных процессов на узко и широкополосные является величина относительной ширины полосы частот к средней частоте, в которой, главным образом, сосредоточен спектр мощности процесса. «Широкополосная» вибрация — это скорее идеализированная модель процесса более простая в теоретических обоснованиях случайных вибраций. Однако, на практике в подавляющем большинстве случаев встречается, именно, «узкополосная» вибрация.

Различают чисто случайные процессы, в которых отсутствуют детерминированные составляющие, «смешанные» — в виде совокупности чисто случайного процесса и детерминированных составляющих, а также «квазидетерминированные», реализации процессов которых описываются функциями времени определенного вида, содержащих один или несколько случайных параметров, не зависящих от времени.

Вибрации могут быть как периодические, так и непериодические. Периодические вибрации образуются процессами, в которых значения колебательных величин повторяются через одинаковые промежутки времени. Примерами периодической вибрации являются процессы гармонических или полигармонических колебаний. Механические колебания, близкие к периодическим, слагающиеся из гармоник с несоизмеримыми периодами образуют почти периодическими колебаниями [16]. В колебаниях систем при наличии двух и более гармоник с близкими частотами возникают биения. Периодические процессы могут быть описаны, не только функциями времени, но и в форме частотного спектра. Под спектром (частот) понимают характеристику совокупности частот гармонических составляющих, расположенных в порядке возрастания [15]. Для гармонических, полигармонических колебаний такие частотные спектры имею вид дискретных характеристик, и называются «линейчатыми». Периодические колебания двух и более механических систем образует эффект синхронных колебаний.

Непериодические вибрации разделяются на «почти периодические» (квазипериодические) и переходные [17]. Почти периодические вибрации могут быть представлены в виде дискретного спектра. Однако, переходные непериодические процессы позволяют определить спектр в качестве лишь непрерывного представления.

Непериодические вибрации возникают в случае воздействия на системы ударов, как некоторых специфических процессов, обладающих импульсным характером проявления. К этому виду воздействий тяготеют, так называемые линейные перегрузки (линейные ускорения), имеющие зачастую характер ступенчатых нагрузок. В обоих случаях в колебательных системах возникают переходные процессы, которые оказываются комбинацией апериодических движений с наложенными на них вибрациями.

Вибрационные и ударные процессы зачастую переводят механические колебательные движения в класс нелинейных. В этих случаях происходят специфические колебания, которые не встречаются в линейных системах. В частности, могут возникать «комбинационные колебания», отвечающие процессам периодических движений с наличием гармоник вынужденных колебаний, частоты которых в целое число раз отличатся от частоты гармонического возбуждения. Если частоты гармоник периодических вынужденных колебаний в целое число раз больше, то их определяют в качестве «супергармонических колебаний», если в целое число раз меньше частоты гармонического возбуждения, то имеют место «субгармонические колебания».

Вибрационные процессы выражаются параметрами поступательных (прямолинейных) или вращательных (угловых) колебаний, а также могут быть комбинированными в случае рассмотрения сложных пространственных движений (поступательно-вращательных).

Вибрационные процессы характеризуют колебательные движения в окрестностях некоторого состояния системы как среднего положения (например, около устойчивого положения равновесия). В связи с этим о колебаниях подобного рода можно говорить в случаях идеализации реальных систем с введением ко-

нечного набора их параметров, изменяющихся лишь во времени. Поэтому вибрационные процессы описываются одним или несколькими обыкновенными дифференциальными уравнениями. Волновые же процессы встречаются в колебательных системах как вполне естественные проявления их механической сущности при наличии фактора влияния протяженности систем.

Волновые процессы — это распространение колебательных движений в пространстве с некоторой конечной скоростью. Волна представляется более сложной моделью движения, адекватность которых реальным системам выше. Поэтому волновые процессы описываются уравнениями в частных производных, которыми учитываются в состояниях колебательных систем не только временные, но и пространственные переменные.

Критерием перехода от колебательного движения к волновому может служить условие некоторой «квазистационарности». Пусть L - характерный размер системы, с — скорость распространения возмущения, Т- время его заметного изменения. В случае, если L меньше сТ, то процесс считается вибрационным, а система - с сосредоточенными параметрами. В случае, если L больше сТ, то процесс считается волновым, а система - с распределёнными параметрами [19].

Волны обычно служат механизмом переноса энергии, осуществляющим в системе переход от неравновесного состояния к равновесному. При этом не происходит существенного перемещения материи, но такое иногда возможно как некоторое побочное действие, сопровождающее распространение волны. Физика подтверждает, что волны выступают фундаментальным явлением в природе, например, выражая корпускулярно-волновой дуализм микромира. В механике волновые процессы занимают, видимо, не менее важное место. Примерами могут служить явления прохождения волн в периодических структурах, которые образуются многослойными материалами, длинными цепями элементов, передающих воздействия, или системами для замедления. Механизмы распространения возмущений в волновых процессах линейных и нелинейных систем существенно различаются. Упругие волны в жидкостях и газах происходят вследствие того, что коллективные движения частиц среды создают чередующиеся сжатия и разрежения. Возмущения передаются от слоя к слою среды преимущественно в направлении, вдоль которого имеются колебания частиц, т.е. волны в жидкостях и газах являются продольными. Твердые тела, обладая сдвиговой упругостью, позволяют распространяться также поперечным волнам.

Различие физических механизмов, реализующих волновой процесс, приводит к их описаниям, основанным на различных сложных системах уравнений. Например, имеют место, в частности, волновые уравнения в виде линейных уравнений в частных производных. Решение волнового уравнения должно находиться с учетом начальных и граничных условий. Большое значение в теории волн имеют гармонические волны. В механике модели волнового характера применяются, например, в акустических процессах, которые определяют поведение систем в условиях шумов. Такие явления оказываются родственными процессам действия высокочастотной вибрации. Поскольку длина волны становится соизмеримой с размерами системы, то рассмотрение движений ведется в качестве волновых процессов.

В общем случае в колебательных системах возможны любые комплексы движений, не только с наложением свободных и вынужденных колебаний, но и совмещение их со случайными, как впрочем, и с учетом возникновения различных комбинации вибрационно-волновых процессов.

Источники и оценки вибрации. Вибрационные процессы следует рассматривать как в аспекте описаний, так и нормирования с точки зрения технического фактора их проявления и допустимого воздействия на объекты современного производства.

Данный фактор обусловливает содержание решений задач оценки и формирования заданных вибрационных состояний объектов техники. В дальнейшем он предопределяет осуществимость разработок методов и средств уменьшения вредного влияния вибрации и динамических нагрузок на надежность, качество объектов, участвующих в технологических процессах, а также на здоровье человека, подверженного опасным виброболезням [20]. Такой фактор в итоге способствует успешности создания проектов и конструкций, открывает возможности достижения требуемой эффективности машин и механизмов, приборов и оборудования, агрегатов и сооружений.

В целом вибрационные процессы в отмеченных аспектах обнаруживают проблему, в узком смысле, обеспечения их контроля, в широком смысле, обеспечения качества, в том числе, безопасности объектов.

Надежность и безопасность являются показателями качества, которое характеризует способность продукции, в том числе изделий, удовлетворять установленным и предполагаемым потребностям (ИСО 8402-94).

Вместе с тем, обязательные требования к продукции, продиктованные безопасностью, принято закреплять нормативно-технической документацией определенного статуса. В России основными формами таких документов являются обязательные стандарты, а также другие руководящие документы, правила и инструкции. В свое время концепция увеличения качества, повышения надежности и безопасности продукции была закреплена международными стандартами качества серии ИСО 9000, которые принимались за основу национальных стандартов в этой области во многих странах, включая Россию (ГОСТ Р ИСО). Согласно этим нормативно-техническим документам организуется и осуществляется направленная деятельность в обеспечение надлежащих требований к качеству продукции.

Такая деятельность содержит, наряду с необходимой оценкой состояний объектов в условиях нагружения (с учетом факторов влияния окружающей среды), проведение соответствующих разработок этих объектов (с учетом факторов опасности), а также выполнение контроля качества, в том числе безопасности. Такой контроль включает проведение измерений, экспертиз и испытаний показателей качества работы объектов.

В основу контроля качества закладываются определенные нормы как допустимые уровни его состояния, способные обеспечить соответствие достигнутых, а также удостоверяемых соответствующими проверками, характеристик надежности и безопасности продукции, включая объекты и процессы, установленным требованиям (по видам продукции).

При этом выполняемая оценка соответствия объектов (прямое или косвенное определение и установление факта соблюдения требований), осуществляется в различных формах, определенный порядок которых документально удостоверяет соответствие продукции, объектов и процессов требованиям стандартов (обязательная сертификация) или условиям договоров и т.п. (добровольная сертификация). Государственные органы и специализированные организации (экспертные, испытательные и прочие), руководствуясь нормативными актами, обеспечивают на основе достигнутых результатов контроля качества надзор за безопасностью продукции [21].

Статистика свидетельствует, что масштабность случаев возникновения серьезных событий нарушения безопасности (аварий и катастроф) в технике велика и продолжает нарастать. Массовыми и весомыми оказываются факты отклонения в режимах работы от допустимых значений, искажение форм и взаимного положения деталей в ненормированных условиях, приводящие к нерасчетным случаям нагрузок деталей, изменению посадок и ослаблению креплений в узлах, ещё многое другое. Это позволяет считать множество объектов, так или иначе сопряженных с какими-либо механическими движениями, особо критичными в отношении показателей надежности и безопасности. Положение усугубляется стремлениями снизить удельные расходы материалов, уменьшить весогабаритные характеристики, увеличить скорости и мощности в работе. Практика показывает, что вибрационные процессы становятся основными причинами отказов (в работе) и разрушений современных машин, агрегатов и механизмов, приборов и оборудования, многих зданий, строений, сооружений и пр.

В свою очередь, это выступает стимулами необходимости усиления контроля за безопасностью и надежностью объектов подобного рода, вибрации которых оказываются в настоящее время одной из важнейших характеристик качества их функционирования. Очевидно, что продукция ответственного назначения становится наиболее приоритетным объектом оценки и контроля качества. В нормативно-техническую документацию по обеспечению надежности стали включать прогнозно-вероятностные оценки серьезности проявления и учета влияния последствий отказов в событиях надежности или безопасности (серия стандартов «Менеджмент риска» - ГОСТ 51901.2,5,6 и др. согласно МЭК 60300-1:2003, 61014:2003 и пр.).

В связи с необходимостью при обеспечении надежности и безопасности получения оценок вибрационных состояний принято раз-

личать следующие группы специфических случаев их проведения:

1) «Вибронадежность» - задачи, решение которых направлено на получение способности объектов выполнять свои функции и сохранять значения параметров в пределах установленных норм вибрации.

2) «Вибропрочность» - задачи, предопределяющие «вибронадежность» так, что решения призваны обеспечивать объектам свойства поддержания их несущей способности с учетом предохранения от разрушающих воздействий вибрационных процессов.

3) «Виброустойчивость» - задачи, решение которых сопряжено с задачами «вибронадежности», но придающие объектам способности функционировать при выдерживании показателей точности (стабильности) их работы в условиях вибрации.

Стремление к ограничениям влияния вибрации по критериям качества и безопасности приводит к необходимости её регламентации, предполагающей установление требований к характеристикам и обоснование определения понятия «нормы». Под требованиями, как правило, полагают предельно допустимые уровни вибрации, которые являются необходимыми и обеспечиваются для удовлетворения заданного (возможного) поведения конкретных объектов. Под нормами следует понимать условия, которые являются обязательными, исходя из реально достижимых для данного класса объектов с предельно минимальными уровнями вибрации для исключения их вредного влияния по заданным показателям качества, включая безопасность.

Определение количественных значений нормы обычно обосновывается (в оговоренных реальных условиях экспериментальным путем с помощью, как правило, статистического анализа процессов). Следует отметить, что их величины в большинстве случаев являются компромиссными, поскольку находятся в зависимости от многих критериев поведения и свойств объектов. Попытки завышения или занижения их нормативных значений вибрации отражаются на показателях эффективности работы, материалоемкости, весогабаритных размерах, наконец, критериях контролеспособности объектов, на затратах производства, сроках и стоимости эксплуатации.

При рассмотрении вопросов обеспечения контроля вредного влияния и уменьшения действия вибрации обычно принято в интересующей механической колебательной системе выделять следующие две подсистемы:

1) Источник, в котором непосредственно порождаются вибрации, т.е. происходят физические процессы, вызывающие нежелательные колебания;

2) Объект, в которых через связи с источником колебания наводятся, а вызывая негативные последствия, заставляют уменьшать вибрации.

Связи в составе этой схемы интерпретируются, как правило, в качестве некоторых динамических воздействий [3]. В дальнейшем будет показано, что возможность целенаправленного формирования этих связей, образующих третью компоненту механических колебательных систем, обнаруживает способность преобразовывать динамические воздействия, тем самым, влиять на свойства и поведение объектов в условиях вибрационных процессов.

Существующие нормы и соответственно требования к вибрационным процессам принято с точки зрения стандартизации подразделять на следующие случаи:

1) «Виброактивность», когда объект, сам генерирует или возбуждает вибрации (объект и источник совмещаются, поскольку внешние воздействия в колебательной системе отсутствуют). Пример — вибрирующие машины или механизмы, по функционированию конструкций которых с собственными колебаниями наступает виброактивность. Она выступает опосредствованной производной качества итогов процесса проектирования, изготовления и эксплуатации объекта. В частности, в этом случае отдельно выделяются эксплуатационные нормы допустимой вибрации.

2) «Вибростойкость», когда объект подвергается воздействию вибрации источника, выступающего по отношению к объекту внешним возбуждением. Пример - вибрирующие приборы, оборудование, здания, строения и сооружения, которые испытывают воздействия со стороны иных источников, включая возбуждение от виброактивных машин и механизмов, динамических нагрузок от транспорта или землетрясений, создающих колебания их оснований или фундаментов.

3) «Вибробезопасность», когда объектом защиты считают человека (тело, его отдельные части), контактирующего с источниками, вибрации которых ограничиваются санитарно — гигиеническими нормами и правилами.

Изложенная градация, исторически послужила определению всех этих случаев в виде различия систем виброзащиты по принципу направления приложения нагрузок, воздействующих между источниками вибрации и объектами. В прежнее время в соответствии с понятием «виброактивности» стали и виброзащиту называть «активной», когда имеется необходимость защиты основания, на котором устанавливается возбуждающий её вибрации объект. Сегодня этот случай определяется другим термином - силовые возмущения, поскольку, именно, они прикладываются в направлении от источника к основанию, фигурирующего в качестве объекта защиты. Тогда же, согласно понятию «вибростойкости», виброзашиту стали называть пассивной, имея ввиду защиту объекта от воздействия его возбуждающего основания. Ныне этот случай определяется термином - кинематические возмущения, которые проявляются в направлении воздействия вибрации от основания, которое выступает в качестве источника перемещений или скоростей колебательных движений. В настоящее время терминология в отношении употребления понятий «активная» и «пассивная» виброзащита изменилась и назначается по принципу наличия в составе механических колебательных систем источников энергии, что будет обсуждаться далее.

Вибрации в условиях современного производства порождают множество разнообразных источников, что затрудняет введение уровней соответствия их в статусе «нормы» с учетом дифференцированных требований к качеству. При этом оценка вибрационного состояния объектов должна отвечать систематизации, как масштабно потребляемых и новых видов конструкций, так и массово сложившихся и вновь образующихся условий их применения.

Стандарты по вибрации и ударам. В связи с необходимостью оценок вибрации и ударов, а также установления технологических принципов, позволяющих получить результаты и признать достоверными эти оценки, осуществляется соответствующая стандартизация во всех индустриально развитых странах.

Большая часть стандартизующих документов по указанной тематике берет начало в изданиях Международной организации по стандартизации (ISO - ИСО).

Технический комитет «Механическая вибрация и удар» ИСО (ТК 108) контролирует любые международные стандарты, связанные с вибрациями и ударными нагрузками. По решению Технического совета ИСО в 2006 г. были уточнена область деятельности и изменено название ТК 108 — «Mechanical vibration, shock and condition monitoring» («Вибрация, удар и контроль состояния). За эти стандарты в сфере ответственности ТК 108 отвечают его подкомитеты (ПК) по следующим разделам:

- ПК 1: «Компенсация, включая компенсирующие машины»;
- ПК 2: «Измерение и оценка влияния механической вибрации и ударных импульсов на машины, транспортные средства и конструкции»;
- ПК 3: «Использование и настройка оборудования, измеряющего вибрации и ударные импульсы»;
- ПК 4: «Влияние вибрации и ударных импульсов на человека»;
- ПК 5: «Контроль состояния и диагностика машин»;
- ПК 6: «Системы возбуждения колебаний и ударных импульсов».

ТК 108 и его ПК поддерживают связи со многими другими комитетами и подкомиссиями ИСО (ТК 20 «Воздушные и космические средства передвижения»; ТК 43 «Акустика»; ТК 45 «Резина и резиновые продукты»; ТК 159 «Эргономика» и др.) и МЭК (ТК 2 «Вращающиеся машины»; ТК 5 «Паровые турбины»; ТК 87 «Ультразвук» и пр.). Они также контактируют с любыми другими организациями (вне ИСО и МЭК), которые заинтересованы в их работе. В ТК 108 ИСО передаются материалы по тематике вибрации и ударных импульсов: комитетом ТК 231 CEN (в части управления оборудованием Европейского союза), подкомиссией СП 37.20 ОИпСА (по вибрационным датчикам) и т.д.

В США главным аналогом ТК 108 ИСО является, аккредитованный ANSI, стандартизующий комитет С2 «Механические вибрации и ударные нагрузки». Комитет С2 руководит Американской технической консультативной группой (ТКГ), которая привлекается для взаимоотношений с ТК 108 ИСО и его ПК (кроме ПК 4). Аналогичный стандартизующий комитет С3 «Биоакустика», аккредитованный ANSI, руководит ТКГ по вопросам влияния вибрации и ударных импульсов на человека» с ПК 4 ТК 108 ИСО.

Однако, стандартами, которые посвящены испытаниям, приближенным к реальности, включая испытания с использованием вибрации и ударных импульсов, занимается в основном Международная электротехническая комиссия и её технический комитет ТК 104 МЭК.

В настоящее время установленные рамки деятельности ТК 108 ИСО охватывают нижеперечисленные вопросы (в скобках - номера стандартов).

1) «Терминология по вибрации и ударам», касающаяся компетенции всех шести ПК ТК 108 ИСО (ИСО 2041) по общим вопросам.

2) «Использование и настройка датчиков и оборудования», которые измеряют вибрации и ударные импульсы, как для контроля при этом состояния объектов (ПК 3 ТК 108 — ИСО 5348, 8042, 18431), так и оценки влияния на человека (ПК 4 ТК 108), а также калибровку датчиков (ИСО 5347, 14694 16063, пр.)

3) «Возбудители колебаний и ударных импульсов», включая терминологию (ПК 6 ТК 108 — ИСО 5344, 6070, 7919, 8568, 8626, 10813, 10816, 10817, 14839, 15261, 18431 и др.).

4) «Конструкции и конструктивные системы», которые относятся к объектам стационарного размещения (ПК 2 ТК 108 - ИСО 8569, 14964 и др.), включая вопросы по вибрации строительных конструкций (ИСО 4866 и др.).

5) «Транспортные средства», которые относятся к вибрации и ударам на мобильных объектах (ПК 2 ТК 108) определенного назначения: наземного транспорта (ИСО 8002, 8608, 10326 и др.); судов (ИСО 4867, 4868, 6954, 10055, 20283); железнодорожного транспорта (ИСО 10056, 10815, 14837);

Многие объекты транспорта стандартизуется в других профильных ТК ИСО (ТК 20 — воздушные и космические средства) или находятся под управлением ОАИ (автотехника), ТК 144 CEN (трактора и сельхозтехника), ТК 151 CEN (строительное оборудование), где в частном случае действует стандарт CEN EC 1032 — испытания движимого машинного оборудования.

6) «Машины и механизмы», затрагивающие определение вибрации и ударов, возникающих во вращательных и возвратно-поступательных машинах, включая компенсацию (ПК 2 ТК 108).

Здесь стандарты определяют широкий спектр вопросов:

- балансировку (ИСО 1925, 1940, 2953, 3719, 10814, 11342, 19499, 20806, др.),
- демпфирование вибрации и ударов объектов (ИСО 10112, 18437 и др.),
- изоляцию объектов от вибрации и ударов (ИСО 2017, 10846, 22762 и др.),
- измерения, оценку влияния вибрации, ударов (ИСО 8528, 13332, 20643 др.),
- контроль состояния и диагностику объектов (ПК 5 ТК 108 - ИСО 13372, 13373, 13374, 13379, 13380, 13381, 17359, 18436 и др.).

Наряду с ИСО многие профессиональные организации (НАПЭ, АНИ, ИПГ, ИГ и многие др.) издают смежные стандарты, посвященные двигателям, генераторам, турбинам, насосам, компрессорам, которые могут содержать разделы, посвященные вибрации и ударам.

В связи с машинами и механизмами ТК 108 сотрудничает с комитетами ИСО (ТК 14 — валы машин и приспособления; ТК 39 — станки и пр.) или МЭК (ТК2 — вращающиеся машины и пр.), а также CEN (ТК 231 - вибрации переносных станков и пр.) и иными профессиональными сообществами.

7) «Человек», посвященные изучению вибрации и ударных импульсов, влияющих, как на организм человека, так и на всю или отдельные части виброконструкции, имеющей контакт с человеком (ПК 4 ТК 108 ИСО).

В связи с этим здесь существуют стандарты по терминологии в этой области (ИСО 5805), специфическим измерениям (ИСО 8041, 8662, 15694 и др.), оценки вибрации человека (ИСО 2631, 5249, 5982, 6897, 8727, 9996, 13091 и др.), передачи воздействий на части тела (ИСО 10068, 10819, 13753, 15230 и др.), особым решениям (эластичность и упругость материалов: ИСО 13753 и др.), руководства по безопасности испытаний и виброэкспериментов с участием людей (ИСО 10227, 13090).

8) «Испытания», касающиеся экспериментальных оценок влияния вибрации и ударных воздействий на объекты.

Следует отметить, что стандарты в этой области, наряду с ИСО, выпущены большей частью МЭК (ТК 104 «Условия окружающей среды, классификация и методы испытаний»). Например, МЭК — 60068, 60721, др. Они посвящены определению реальных изменений в объектах, вызванных воздействиями извне, включая приложение виброударных нагрузок. В частности, рекомендации МЭК 60068-2 в рамках «рабочих программ» испытаний касаются действия синусоидальной вибрации, широкополосной случайной вибрации, ударных импульсов испытаний и свободного падения.

Вместе с тем, большой вклад в стандартизацию проведения испытаний различных транспортных средств, оборудования и сооружений в случаях многих видов воздействий, включая приложение виброударных нагрузок, принадлежит NASA и МО (министерству обороны США).

К настоящему времени NASA, ориентируясь на летательные аппараты и бортовое оборудование, выпустило три стандарта, посвященные испытаниям на виброакустические и ударные нагрузки (www.standards.nasa.gov).

Стандарт NASA-STD 7001 «Критерии виброакустических испытаний бортового оборудования» затрагивает условия структурно возникающей в конструкциях объектов вибрации вследствие интенсивных акустических шумов возбуждения окружающей среды и устанавливает уровни испытаний. Стандарт NASA-STD 7002 «Требованиями к испытаниям бортового оборудования» нормирует факторы возбуждения в виде наиболее критичных нагрузок, которые устанавливают планируемые воздействия при испытаниях с определенными значениями параметров или статистических оценок и используются для проверки (демонстрации) заданных функций объектов. Стандарт NASA-STD 7003 «Критерии испытаний пироудара» определяет методологию испытаний объектов с контролем допустимых пределов нагрузок, динамического анализа и прогнозирования развития возбуждения в виде ударных нагрузок. Руководящий документ NASA — NDBK — 7004 «Силовые ограничения вибрационных тестов» затрагивает методологию проведения испытаний в случаях необходимости детализации влияния вибрационных сил (по режимам полета). Руководящий документ NASA — NDBK — 7005 «Критерии изменения окружающей среды» формулирует схему и критерии испытаний объектов, находящихся под воздействием широкого диапазона ударных импульсов и вибрации. Рассматриваемые методики могут быть пригодными для испытаний, не только в NASA, но и в отношении оборудования гражданских сфер техники.

Во многих случаях стандарты МО США уникальны и более полезны, как признается зарубежными специалистами, чем гражданские стандарты, хотя последние призваны постепенно упразднить военные. Стандарт МО STD-810 «Инженерия окружающих условий и лабораторные испытания» (6 изд.) охватывает большинство случаев внешних воздействий на объекты, включая вибрации и ударные нагрузки. Его вкладом в развитие стандартизации является введение в схему и процессы проектирования процедур испытаний, которые не затрагивались в коммерческих условиях и были положены в основу американских испытательных программ техники и распространились на многие страны. Наиболее полезными признаются стандарты по вибрации и ударам на космических аппаратах (МО STD-340, 1540), на военно-морском флоте по ударным воздействиям (МО-S-901D) и корабельной вибрации (MIL-STD-167), а также надежности (MIL-STD-781), части которых находятся в процессах преобразования в стандарты ANSI или ИСО.

Центральное место среди тематических направлений деятельности ИСО занимают стандарты, посвященные, так называемой, «оценке серьезности вибрации или ударов», касающиеся «виброактивных» объектов.

К сожалению, охватить вопросы стандартизации и нормирования с единых позиций (в рамках обобщающей классификации существующих и возможных источников вредной вибрации) представляется крайне сложным вследствие весьма широкого диапазона типов машин и механизмов, создаваемых и используемых в современной технике.

В связи с этим в стандартах ИСО, интересующая оценка серьезности и описание пределов допустимых вибрации, отнесено к двум основным группам объектов:

1) «Механическая вибрация не возвратно-поступательных машин — измерения на вращающихся валах и критерии оценки» (стандарты ИСО серии 7919), включающие:

- общие принципы (часть 1);
- наземные паровые турбины и генераторы мощностью более 50 МВт с нормальными рабочими скоростями 1500, 1800, 3000, 3600 об/мин. (часть 2);
- спаренные промышленные машины (часть 3);
- газовые турбинные наборы (часть 4);
- набор машин в производстве гидроэнергии и насосные заводы (часть 5).

2) «Механическая вибрация — оценка вибрации машины измерениями на невращающихся частях (стандарты ИСО серии 10816), включающие:

- общие принципы (часть 1);

- наземные паровые турбины и генераторы мощностью более 50 МВт с нормальными рабочими скоростями 1500, 1800, 3000, 3600 об/мин. (часть 2);

- промышленные машины с нормальной мощностью более 15 КВт и номинальными скоростями, измеренными на месте 120 -1500 об/мин. (ч. 3);

- группы газовых турбин, исключая самолетные модификации (часть 4);

- группы гидроэнергетических машин и насосные заводы (часть 5);

- возвратно-поступательные машины с мощностью выше 100 КВт (часть 6);

- центробежные насосы промышленного применения (часть 7).

Для определения требований и оценки серьезности вредной вибрации, которые позволяют в целом установить соблюдение норм в рассматриваемых объектах, используются измерения данных, как снятые с вращающихся валов (первая группа стандартов), так и сделанные на неподвижных корпусах и/или основаниях (вторая группа стандартов). Стандарты, несмотря на приложение к различным классам и типам машин, учитывает их специфику через введение определенных критериев оценки в конкретных случаях источников.

Технологические процедуры оценки вибрации в этих стандартах сведены к широкополосным измерениям сериями колебаний вала и/или основания (независимо от частоты и фазы). Предложенный способ позволяет для определенных групп машин выбрать соответствующие ключевые критерии. Они включают оценки величин смещений вала от центральной линии шейки, а также отношения жесткости основания и подшипников, определяемого через вибрации вала относительно вибрации основания. Машины лучше подходят для измерения вибрации: при низких отношениях жесткости (жестких опорах) - в основании и/или на корпусе, при высоких отношениях жесткости (относительно мягких опорах) - на вале.

Величины вибрации, ограничиваемые этими стандартами, основываются на среднеквадратических оценках, которые определяются максимальными значениях их в виде широкополосной скорости в заданном диапазоне частот (обычно от 10 до 1000 гц). Допускаются вместо среднеквадратических значений пиковые оценки в виде перемещений и/или ускорений вибрации. Критерии оценки «серьезности вибрации», наряду с величинами вибрации, учитываются в этих стандартах также в качестве наличия изменений в таких величинах (по указанным зонам оценки).

Стандарты ИСО посвящены, не только оценке «серьезности вибрации», но и контролю состояния вибрации, который должен проводиться путем измерения вибрации (ИСО 13373), мониторинга состояния и диагностики машин и иных объектов (ИСО 11372, 11373, 11379, 17359).

Предлагаемые этими документами, общие принципы измерения вибрации машин для контроля над состоянием предусматривают: методы измерения и параметры; выбор датчиков, местоположение и крепление; сбор данных; эксплуатационные режимы машины; контролирующие системы; системы концентрации сигнала; интерфейсы с системами обработки данных; непрерывный и периодический контроль.

Относительное новое направление в деятельности ТК 108 в рамках системы «Мониторинг состояния и диагностика машин» стандарты для обучения персонала и сертификации (ИСО 18436). Требования в контроле состояния вибрации и диагностике предусматривают схему и 4 категории (сложности работ) для сертификации персонала по вибрационному анализу, который выполняет мониторинг состояния и диагностику. При этом кандидаты должны освоить определенный курс обучения и пройти практику. Регламентируются требования к сертифицирующим и обучающим органам, обучение специалистов по управлению смазкой и анализом, термографии, диагностике и прогнозированию, контролю над состоянием, балансировке.

Продолжают действовать стандарты ИСО серии «вибрация», которые устанавливают соответствующие требования, относительно самостоятельно, для транспортной отрасли, ввиду специфичности их объектов и источников.

Под эгидой ТК 108 в рамках подкомиссии ПК 2 имеют место стандарты: измерения профилей дорожных покрытий (8608); измерения и оценки вибрации сидений транспортных средств, применяемых на колесных сельскохозяйственных тракторах (5007), на машинах для полевых работ (5008), на землеройных машинах (7096), на железнодорожном транспорте (10326); измерения и анализ общей вибрации, воздействующих на пассажиров и экипаж железнодорожных транспортных средств

(10056), также оценке вибрации и шума, вызываемого их движением (14837), включая измерение вибрации внутри железнодорожных туннелей при прохождении поездов (10815); испытаниям на вибрацию и удары оборудования подвижного состава (61373); измерениям вибрации на судах (4867), включая оценку вибрации на пассажиров и членов экипажа судов (6954); измерения и представления их результатов для судовых конструкций оборудования (4868) и испытаниям судового оборудования и машин (10055).

Широкий круг вопросов, касающихся вибрации и ударов, затрагивает компетенции не только ТК 108, но и других технических комитетов ИСО по ряду смежных проблем.

В введении ТК 43 и подкомиссии ПК 1 ТК 108 находятся стандарты серии «Акустика и вибрация». ТК 104 под эгидой МЭК принял участие в издании серии нормативных документов по испытаниям на воздействие внешних факторов - механических воздействий (вибрации, ударов, землетрясений, наведенных акустикой, транспортной тряски, свободного падения и опрокидывания оборудования и пр.)

Известны, разработанные ТК 45 совместно с ПК 4 ТК 108, которые отвечают вопросам безопасности при защите объектов в условиях сейсмических воздействий.

Сюда же примыкают вопросы ТК 98 с участием ПК 2 ТК 108 по расчетам строительных конструкций при сейсмических колебаниях, измерениям и оценкам воздействия вибрации и ударов на здания, контролю состояний сооружений и оценке влияния вибрации зданий на оборудование, чувствительное к этим воздействиям.

Вопросы, относящиеся к вибрации ручных машин, прорабатываются ТК 118 и ТК 23 (ручные машины лесного хозяйства) с участием ПК 3 ТК 108.

По ряду проблем создания и работоспособности объектов и источников отраслевого назначения, касающихся важных вопросов вибрации и ударов, действуют самостоятельные стандарты ИСО других технических комитетов: измерение вибрации подшипников качения (ТК 4); измерение вибрации гидравлических машин - турбин, гидроаккумулирующих насосов и насосо-турбин (ТК 5); определение вибрации зубчатых механизмов (ТК 60); измерения вибрации и качество балансировки промышленных вентиляторов (ТК 117); измерения, оценка и испытания вибрации двигателей внутреннего сгорания поршневых (ТК 70).

Рассмотренные выше стандарты ИСО - одной из наиболее признанных организаций в этой области, являются для России, как и для других стран, актуальными, поскольку внимание во всем мире переместилось с развития национальных стандартов к использованию сложившихся международных норм и регламентов как некоторых региональных стандартов. Потенциал стандартизации, снимая препятствия в научно-техническом сотрудничестве, гарантируют доступ к высокотехнологичной продукции всех стран мира.

В нашей стране функции стандартизации (бывшего Госстандарта СССР), переданные Комитету РФ по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарту РФ), впоследствии - Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулированию http://techreglament.ru). С учетом решения Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (стран СНГ) полномочия в области вибрации и ударов возложены с 1999 г. на Межгосударственный технический комитет по стандартизации (МТК) 183 «Вибрация и удар».

За технический комитетом по стандартизации (ТК) ««Вибрация и удар» закреплены вопросы (Приказ Госстандарта РФ от 8.12.99 N 530), связанные с работами машин, механизмов, оборудования и транспортных средств, а также воздействия вибрации и удара на человека и конструкции.

Ведение секретариата ТК 183 "Вибрация и удар" поручено Открытому акционерному обществу "Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем" (АО НИЦ КД, г. Нижний Новгород http://nitskd.ru) с возложением на него функций постоянно действующего национального рабочего органа в МТК 183. НИЦ КД под эгидой ТК 183.

В России стандарты, относящиеся к этой сфере, как правило, имеют национальное происхождение так, что государственный фонд изданий на настоящее время насчитывает около 120 соответствующих документов в области вибрации, ударов, шума, других, примыкающих к ним направлениям приложений. Значительная часть этих стандартов, особенно в последнее время, введены в действие на основа-

нии разработок и рекомендаций ИСО, отражая процессы перехода России в международное сообщество.

В последние десятилетия ведущей тенденцией в развитии принципов международной стандартизации во всех областях деятельности является решение вопросов, так называемого, «технического регулирования» [21].

Под «техническим регулированием» понимают- правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции или к связанным с ними процессам проектирования, изыскания, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации. В отношении других требований (необязательных) к продукции и процессам, выполнению работ и оказанию услуг действует правовое регулирование на добровольной основе путем введения оценки соответствия (прямого или косвенного определения соблюдений согласованных требований, предъявляемых к объектам) [21].

В настоящий период в нашей стране осуществляется реформирование системы стандартизации так, что создаются обязательные технические регламенты с соответствующей системой дополняющих стандартов добровольного (декларативного) плана. Под техническими регламентами следует понимать документы, которые устанавливают обязательные для применения и исполнения требования, прежде всего, обязательные по основным показателям безопасности для продукции, включая здания, строения, сооружения, и связанным с ними процессам (поименованным выше) - объектам технического регулирования. Всё это направлено на более определенную упорядоченность и ужесточение условий обеспечения качества продукции (изделий).

В основу контроля качества продукции (включая объекты и процессы) закладываются определенные нормы (допустимые уровни их состояния), способные обеспечить соответствие достигнутых (удостоверяемых проверками) или декларированных изготовителем (в реформируемой системе стандартизации) характеристик надежности и безопасности установленным требованиям.

Вместе с тем, оценка соответствия объектов (прямое или косвенное определение или установление соблюдения требований), осуществляется в различных формах, определенный порядок которых документально удостоверяет соответствие продукции, объектов и процессов требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

Государственные органы и аккредитованные специализированные организации (экспертные, испытательные и другие), руководствуясь нормативными актами, обеспечивают на основе контроля качества надзор за безопасностью продукции. При этом предусматривается за невыполнение обязательных требований введение штрафов разработчикам и изготовителям, устранение нарушений за счет виновной стороны, также возмещение убытков потребителя или заказчика (по их требованию).

Кроме того, разработчик и изготовитель несут ответственность за декларированные показатели на всех этапах жизненного цикла продукции. Вместе с тем, потребитель (в статусе работодателя) несет ответственность за безопасную эксплуатацию изделий, за соблюдение необходимых режимов работы и должного технического состояния, за проведение требуемого обслуживания, ремонтов в соответствии с действующим законодательством.

В настоящее время постановлениями Правительства России закреплен перечень первоочередных технических регламентов, подлежащих разработке и введению в действие в стране. В связи с этим в процессах реформирования следует ожидать некоторого нового порядка использования действующих и необходимых в перспективе стандартов, которые касаются продукции и связанных с ней процессов во всех сферах современной и будущей техники. Соответствующим изменениям, видимо, подвергнуться и стандарты, которые относятся к области установления, применения и исполнения требований по вибрации и ударам. Важным будет включение в технические регламенты технологий оценки вибрационных состояний объектов, достигнутых к настоящему времени передовым научно-техническим сообществом в мире.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. ГОСТ 24346-80 «Вибрация. Термины и определения». Издательство стандартов, 1980. - 36 с.

2. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. Совет: В.Н.Челомей (пред.) — М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. 1978. 352 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. Совет: В.Н.Челомей (пред.) — М.: Машиностроение, 1981. - Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. 1981. 456 с.
4. Harris* Shock and Vibration Handbook / Cyril M. Harris, ed.; Allan G. Piersol, ed. / - 5 th ed. McCraw — Hill, 2002. 866 p.
5. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. Совет: В.Н.Челомей (пред.) — М.: Машиностроение, 1978-1981.
6. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х т. / Под общ. ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. - М.: «Машиностроение», 1968.
7. Энциклопедия "Машиностроение". В 2-х кн. / Под ред. К.С. Колесникова. Том I-3. «Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин». - М.: «Машиностроение», 1994.-534 с.
8. Теория механизмов и машин. Терминология. Буквенные обозначения величин. Вып. 99. — М.: Наука, 1984. - 40 с.
9. Коловский М.З. Динамика машин. - Л.: Машиностроение ЛО, 1989. -263 с.
10. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. — М.: Наука, 1975. - 676 с.
11. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.,1990. -502 с.
12. Фролов К.В., Попов С.А. Теория механизмов и механика машин, — М.: Высш. шк., 2005. - 496 с.
13. Светлицкий В.А., Нарайкин О.С. Упругие элементы машин. - М.: «Машиностроение», 1989. — 264 с.
14. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. В 2-х т. Т. II Динамика. — М.: Наука, Гл. ред. физ.- мат. лит., 1983. - 640 с.
15. Теория механических колебаний. Терминология (проект) — М.: изд. ИМАШ, 1984. — 20 с.
16. Механические колебания. Основные понятия. Терминология. Буквенные обозначения величин. Сб. рекомендуемых терминов. Вып. 106. - М.: Наука, 1987. — 24 с.
17. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2-х кн. Кн. 1 /Под ред. В.В. Клюева - М.: «Машиностроение», 1978. — 448 с.
18. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.,1981. -568 с.
19. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. - 384 с.
20. Ивович В.А., Онищенко В.Я. Защита от вибрации в машиностроении. - М.: «Машиностроение», 1990. — 272 с.
21. Аронов И.З., Версан В.Г., Галлеев В.И. Техническое регулирование: теория и практика / Под ред. Версана В.Г. — М.: ЗАО «Изд-во Экономика», 2006. — 308 с.

Упырь Р.Ю., Насников Д.Н., Логунов А.С.

УДК 656.001

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ

Для многих технических приложений важным является описание положения в пространстве каждого элемента системы. Наиболее распространенный прямой метод такого определения заключается в использовании в качестве координат перемещений отдельных элементов. Будем полагать, что элементы механической цепи достаточно плотно заполняют пространство, чтобы при конечном числе элементов было обеспечено непрерывное заполнение при известной геометрии механической цепи.

Когда исследуется вопрос о продольных колебаниях стержня с выделением так называемых элементарных частиц, естественно предполагать непрерывное распределение, которое невозможно представить конечным числом индексов или величин. Но тем самым мы, можем быть, снимаем и саму возможность возникновения и реализации движения [1]. Во всяком случае, математические модели, связанные с элементарными представлениями, должны оставлять место для реализации естественных движений, иначе процедуры обобщения или интеграции могут в физическом смысле привести к устранению возможностей развития каких-либо движений. Хотя можно, по-видимому, ставить вопрос о других формах проявления силовых или динамических взаимодействий [2].

Пусть x, y, z будут декартовыми координатами центра тяжести элемента механической цепи, находящейся в статическом равновесии. Если обозначить $\rho\,(x, y, z)$ плотность массы в элементе, то этот элемент будет обладать массой $dm = \rho(x, y, z)dV$, т.е. можно полагать, что элемент механической цепи является материальным объектом, имеющим объем dV. Пусть u, v и w являются тремя компонентами перемещений центра масс элемента относительно положения равновесия. Эти компоненты зависят от положения центра тяжести элемента в пространстве и от времени

$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z, t), \\ V &= V(x, y, z, t), \\ w &= w(x, y, z, t). \end{aligned} \qquad (1)$$

Эти функции перемещений могут рассматриваться как координаты механической системы. Переменные x, y, z используются для фиксирования положения рассматриваемых элементов механической цепи.

При конечном числе элементов механической цепи мы будем иметь конечное число степеней свободы. Если число элементов механической цепи будет возрастать до бесконечности, то одновременно будем предполагать уменьшение параметров элемента цепи до материальной частицы, что при заданных представлениях о конечных размерах механической цепи можно представить как предельный переход к упругому стержню.

Вопрос об исчислимости, представляет интерес, так как с каждой степенью свободы связано представление о собственной частоте. Если число степеней свободы исчислимо, то собственные частоты дискретны; их можно расположить в определенной бесконечной последовательности $\omega_1, \omega_2 \ldots \omega_n$. Под «исчислимостью» будем подразумевать то, что система элементов цепи может быть поставлена в однозначное соответствие с числами 0,1,2,3...Можно показать, к примеру, что рациональные числа исчисляемы, тогда как число точек на отрезке линии неисчислимо.

Координаты u, v и w, однако, не являются полностью независимыми и объединяются некоторыми связями. На границах, где механическая цепь находится в соприкосновении с основанием (система отсчета) или иной средой, функции перемещения (так их можно условно назвать) подчинены некоторым зависимостям, которые часто [1] называются граничными или краевыми условиями. Такие понятия, используемые при рассмотрении колебаний упругих тел, предстоит интерпретировать в отношении механической цепи как системы элементов с упругими связями.

На перемещения точек внутри механической цепи можно наложить зависимость иного типа, а именно: требования, чтобы функция перемещений была непрерывной и дифференцируемой несколько раз относительно пространственных координат.

Пока в этом плане имеется трудность, поскольку функцию перемещения предстоит только определить.

Надо учесть также необходимость введения ряда допущений. К примеру, при определении формы упругой линии, деформируемой механической цепи можно предположить, что в системе реализуется однонаправленное движение, а также и то, что точки данного поперечного сечения перемещаются совместно, как некоторая жесткая плоскость (тело двигается прямолинейно в направлении координаты u).

Функция перемещения может рассматриваться как сумма бесконечного ряда данных функций. Например, для описания формы упругой линии деформированной балки, свободно опертой по концам, можно использовать тригонометрический ряд

$$\omega = \sum_{n=1}^{\infty} g_n \sin\frac{n\pi x}{l}. \qquad (2)$$

Выбирая систему величин для коэффициентов $g_1, g_2, \ldots g_n \ldots$, число которых (для упругой балки) бесконечно, но исчислимо, можно единственным образом определить деформацию балки. Однако в отношении системы с конечным числом степеней свободы необходимо учитывать ряд особенностей. Таким образом, система величин q может рассматриваться как обобщенные координаты системы [1]. Отметим, что при рассмотрении практически всех видов колебаний балок (продольные, поперечные, крутильные) можно построить аналоги в виде механических цепей с соответствующими интерпретациями параметров цепи.

I. Определим частоты и формы главных поперечных колебаний однородной балки длиной l, шарнирно опертой по концам и нагруженной в точках $x = \frac{1}{3}l$ и $x = \frac{2}{3}l$ двумя равными грузами веса G. Момент инерции поперечного сечения балки -I, модуль упругости -E, массой самой балки можно пренебречь (рис. 1).

Для получения общего решения задачи, предполагающего действие различных грузов G_1 и G_2, будем полагать также, что точки приложения грузов G_1 и G_2 определяются как l_1 и l_3 (рис.1).

Принимая y_1 и y_2 за обобщенные координаты, определяющие отклонения грузов от положения равновесия, найдем кинематическую энергию как

$$T = \frac{1}{2}\left(m_1 \dot{y}_1^2 + m_2 \dot{y}_2^2\right). \qquad (3)$$

Потенциальная энергия системы находится как сумма потенциальных энергий упруго-деформированной балки Π_1 и потенциальной энергии Π_2 грузов G_1 и G_2 в поле силы тяжести:

$$\Pi_1 = \frac{1}{2}P_1(f_1 + y) - \frac{1}{2}P_1^0 f_1 + \frac{1}{2}P_2(f_2 + y_2) - \frac{1}{2}P_2^0 f_1, \qquad (4)$$

где

$$\begin{aligned} P_1 &= \bar{c}_{11}(f_1 + y_1) - \bar{c}_{12}(f_2 + y_2); \\ P_2 &= \bar{c}_{22}(f_2 + y_2) - \bar{c}_{21}(f_1 + y_1); \end{aligned} \qquad (5)$$

коэффициенты $\bar{c}_{11}, \bar{c}_{12}, \bar{c}_{21}, \bar{c}_{22}$ зависят от жесткости балки при изгибе и положения грузов

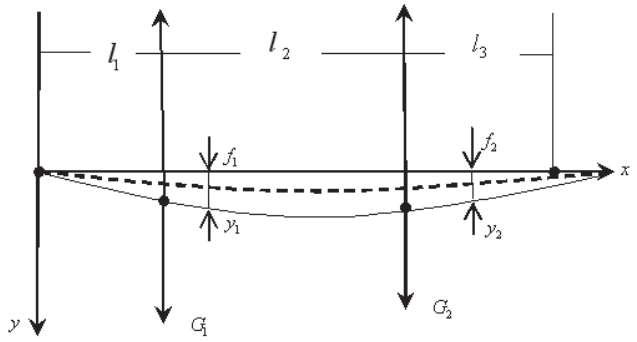


Рис. 1. Принципиальная схема балки, совершающей поперечные колебания и имеющей два сосредоточенных груза.

на балке и определяются по известным формулам [3,4].

Прогибы балки в месте расположения грузов при равновесном положении системы обозначаются f_1 и f_2, поэтому

$$P_1^0 = \bar{c}_{11} f_1 - \bar{c}_{12} f_2 = G_1; \qquad P_2^0 = \bar{c}_{22} f_2 - \bar{c}_{21} f_1 = G_2. \tag{6}$$

Так как потенциальная энергия грузов G_1 и G_2 в поле силы тяжести

$$\Pi_2 = -Gy_1 - G_2 y_2, \tag{7}$$

то для вычисления всей потенциальной энергии системы получим

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 = \frac{1}{2}\left[P_1\left(f_1 + y_1\right) + P_2\left(f_2 + y_2\right)\right] - \frac{1}{2}\left(G_1 f_1 + G_2 f_2\right) - G_1 y_1 - G_2 y_2. \tag{8}$$

Подставляя в (8) P_1 и P_2 и учитывая условия равновесия системы

$$1)\left(\frac{\partial \Pi}{\partial y_1}\right)_0 = \frac{1}{2}\left(\bar{c}_{12} - \bar{c}_{21}\right) f_2 = 0;$$

$$2)\left(\frac{\partial \Pi}{\partial y_2}\right)_0 = \frac{1}{2}\left(\bar{c}_{21} - \bar{c}_{12}\right) f_1 = 0,$$

окончательно получим

$$\Pi = \frac{1}{2}\left(\bar{c}_{11} y_1^2 - 2\frac{\bar{c}_{12} + c_{21}}{2} y_1 y_2 + \bar{c}_{22} y_2^2\right). \tag{9}$$

Имея выражения T и Π, определяем значения коэффициентов инерции и жесткости системы

$$a_{11} = m_1 = \frac{G_1}{g}; a_{12} = 0. \quad a_{22} = m_2 = \frac{G_2}{g},$$

$$g = 9.81 \ м/сек^2, \quad c_{11} = \bar{c}_{11},$$

$$c_{12} = -\frac{\bar{c}_{12} + \bar{c}_{21}}{2}; \quad c_{22} = \bar{c}_{22}.$$

Получим систему дифференциальных уравнений и ее структурную схему (рис. 2)

$$\left.\begin{aligned} a_{11}\ddot{y}_1 + c_{11} y_1 + c_{12} y_2 = 0 \\ a_{22}\ddot{y}_2 + c_{21} y_1 + c_{22} y_2 = 0 \end{aligned}\right\}. \tag{10}$$

Уравнение частот имеет вид

$$\left(c_{11} - a_{11}k^2\right)\left(c_{22} - a_{22}k^2\right) - \left(c_{12} - a_{12}k^2\right)^2 = 0 \tag{11}$$

или

$$\left(\bar{c}_{11} - \frac{G_1}{g}k^2\right)\left(\bar{c}_{22} - \frac{G_2}{g}\right)k^2 - \left(-\frac{\bar{c}_{12} + \bar{c}_{21}}{2}\right)^2 = 0.$$

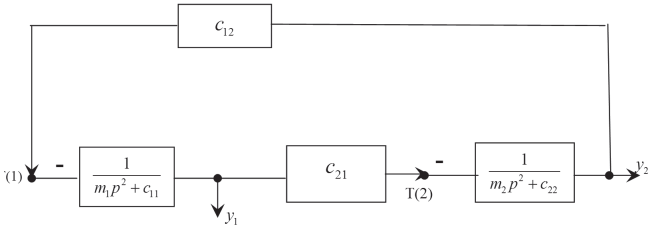


Рис. 2. Структурная схема системы, соответствующая уравнению.

После соответствующих преобразований уравнение частот (11) получает вид

$$k^4 - \frac{g}{G_1 - G_2}\left(\bar{c}_{11} G_2 + \bar{c}_{22} G_1\right)k^2 + \frac{g^2}{4G_1 G_2}\left[4\bar{c}_{11}\bar{c}_{22} - \left(\bar{c}_{12} - \bar{c}_{21}\right)^2\right] = 0, \tag{12}$$

откуда

$$k_{1,2}^2 = \frac{g}{2G_1 G_2}\left\{\bar{c}_{11} G_2 + f_2 \bar{c}_{22} G_1 \pm \sqrt{\begin{aligned}&\left(\bar{c}_{11} G_2 + \bar{c}_{22} G_1\right)^2 - \\ &-G_1 G_2\left[\begin{aligned}&4\bar{c}_{11}\bar{c}_{22} - \\ &-\left(\bar{c}_{12} + \bar{c}_{21}\right)^2\end{aligned}\right]\end{aligned}}\right\}. \tag{13}$$

Так в нашем случае $l_1 = l_2 = \frac{l}{3}$, $\bar{c}_{11} = \bar{c}_{22}$, $\bar{c}_{12} = \bar{c}_{21}$, $f_1 = f_2$, $G_1 = G_2 = G$, то

$$k_1^2 = \frac{g}{G}\left(\bar{c}_{11} - \bar{c}_{12}\right); \quad k_2^2 = \frac{g}{G}\left(\bar{c}_{11} + \bar{c}_{12}\right). \tag{14}$$

Зная k_1 и k_2, определим значения коэффициентов распределения

$$\mu = -\frac{c_{11} - a_{11}k_1^2}{c_{12} - a_{12}k_1^2} = -\frac{\bar{c}_{11} - \frac{Gg\left(\bar{c}_{11} - \bar{c}_{12}\right)}{gG}}{\left(-\frac{\bar{c}_{12} + \bar{c}_{11}}{2}\right)} = +1. \tag{15}$$

$$\mu = -\frac{c_{11} - a_{11}k_2^2}{c_{12} - a_{12}k_2^2} = -1. \tag{16}$$

Вычислив значения коэффициентов распределения μ_1 и μ_2, получим формы главных поперечных колебаний балки (рис. 3)

$$\mu_1 = \frac{A_2^{(1)}}{A_1^{(1)}} = +1, \quad \mu_2 = \frac{A_2^{(2)}}{A_1^{(2)}} = -1. \tag{17}$$

В нашем случае -

$$\bar{c}_{11} = \bar{c}_{22} = \frac{1296}{5}\frac{E_1}{l^3}; \quad \bar{c}_{12} = \bar{c}_{21} = -\frac{1134}{5}\frac{EI}{l^3}$$

$$k_1 = 5{,}69\sqrt{\frac{EIg}{Gl^3}}, \qquad k_2 = 22{,}04\sqrt{\frac{EI}{Gl^3}}.$$

При вычислении коэффициентов распределения, обращаясь к структурной схеме на рис. 3, и предполагая, что возмущение носит силовой характер (Т.1, рис.3), можно получить передаточные функции, используя правила структурных преобразований:

$$\frac{\bar{y}_2}{\bar{p}} = \frac{c_{21}}{A}, \tag{18}$$

$$\frac{\bar{y}_1}{p} = \frac{m_2 p^2 + c_{22}}{A}, \tag{19}$$

где $A = \left(m_1 p^2 + c_{11}\right)\left(m_2 p^2 + c_{22}\right) - c_{12} c_{21}$.

Если $\bar{p}$ приложено в точке (2) (рис.3), то

$$\frac{\bar{y}_2}{\bar{p}} = \frac{m_1 p^2 + c_{11}}{A}; \qquad 0)$$

$$\frac{\bar{y}_1}{\bar{p}} = \frac{g_2}{A}. \tag{21}$$

Откуда можно найти, что

$$\mu_{1,2} = \frac{c_{11} + m_1 p^2}{c_{22} + m_2 p^2}. \tag{22}$$

Физический смысл коэффициентов распределения заключается в том, что они представляют собой отношение выходных обобщенных координат на структурной схеме в области преобразований Лапласа при задании на входе последовательно в точках (1) и (2) (рис. 3) силового внешнего воздействия (единичного в частности).

Принимая за основу уравнение (11), отметим, что расчетной схеме на рис.1 можно сопоставить эквивалентную в динамическом отношении цепную механическую цепь из двух элементов (рис.4), для которой $k_0 + k_1 = c_{11}, k_1 = c_{12} = c_{21}$,

$k_2 + k_1 = c_{22}, a_{11} = m_1, a_{22} = m_2$.

Структурная схема эквивалентной в динамическом отношении САУ представлена на рис. Рис. 5.

Выражения для коэффициентов распределения могут быть аналогичным образом получены также из структурной схемы на рис. 5; по форме они совпадают.

Соединив прямыми линиями неподвижную точку 0 с концом амплитуды груза G_1, а также концы амплитуд грузов G_1 *и* G_2 между собой, получаем график, позволяющий определить амплитуду колебаний любой точки пружины. График, изображающий форму второго главного колебания, показывает, что одна точка верхней пружины имеет амплитуду, равную нулю. Такая точка называется «узловой

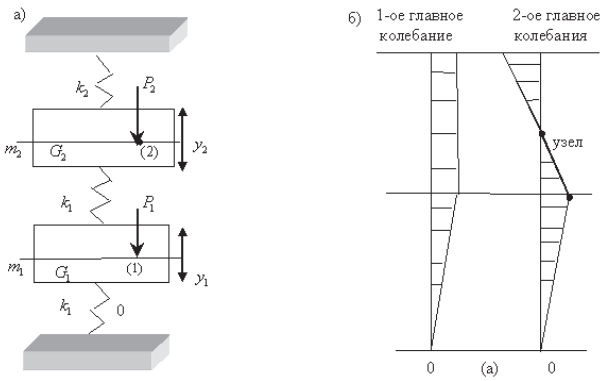


Рис. 4. а)- расчетная схема цепной системы с двумя степенями свободы, б) - формы главных колебаний.

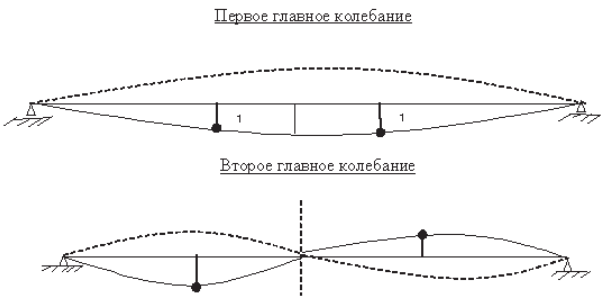


Рис. 3. Формы главных колебаний для балки, представленной на рис. 1.

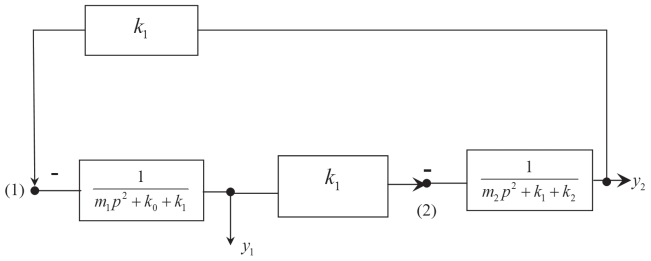


Рис. 5. Структурная схема эквивалентной САУ для расчетной схемы на рис. 4.

точкой или узлом». Таким образом, первое главное колебание системы на рис. 4 не имеет узла, а второе — имеет один узел.

Сравнивая две расчетные схемы на рис. 1 и рис. 4, можно отметить их эквивалентность, однако, интерпретация особенностей требует учета ряда факторов. На рис. 3 наглядно представлены формы колебаний в виде фрагментов тригонометрических функций, что открывает возможности использования интегральных обобщений. Что касается форм колебаний на рис. 4б, то предстоит физически осмыслить, с какой картиной распределения отклонений придется столкнуться при интегральных обобщений, хотя можно поставить вопрос и иначе в плане представления механической цепи соответствующей балкой с конечным числом грузов для нагружения.

Во всяком случае колебания механической цепи должны рассматриваться с учетом линейных параметров (длин пружин, расстояний между колеблющимися массами). В свою очередь длина пружин в суммарном представлении будет определять время и скорость распространения возмущения по механической цепи или параметры волновых процессов [5].

II. Непосредственное использование 2-ого закона Ньютона к элементу механической цепи (механическая система, материальных тел с упругими связями) дает уравнения

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}dV = df_x;\ \rho\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}dV = df_y,\ \rho\frac{\partial^2 w}{df^2}dV = df_z,$$

где df_x, df_y, df_z - силы, действующие на элемент механической цепи, имеющий элементарный объем dV. При свободных колебаниях ими являются упругие силы, обусловленные деформацией механической цепи. Они связаны с u, v и w законами упругих деформаций, которые связывают силы с напряжениями, напряжения с деформациями, деформации — с перемещениями. Если обратиться к теории упругости, то надо принять во внимание на зависимость сил от перемещения.

В принципе такие уравнения имеют следующую форму:

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = L_x(u,v,w);$$
$$\rho\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = L_y(u,v,w); \qquad (23)$$
$$\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = L_z(u,v,w),$$

где L - является линейным дифференциальным оператором, включающим частные производные относительно пространственных переменных различных порядков

$L = L\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$, упругие постоянные. Отметим, что время t не входит в явном виде в правую часть.

Такие дифференциальные уравнения в частных производных являются, по-существу, формулировкой закона движения Ньютона и закона упругих деформаций Гука с соответствующим учетом распределения масс и упругих свойств механической цепи. Однако необходимо принять во внимание и ряд других условий. Первая система условий может быть названа граничной. Они определяют характер взаимосвязи механической системы с основанием, а также характер связи механической системы с другими формами и проявлениями внешней среды.

Такая постановка задачи необходима для определения характера (общих свойств) колебательного процесса или движения, которые может иметь механическая цепь или система. Если возникает задача конкретных параметров движения, то необходимо ввести в рассмотрение начальные условия, которые характеризуют перемещение и скорости в некоторый момент времени $t = t_0$.

При колебаниях механической цепи каждый фрагмент цепи попеременно испытывает растяжение и сжатие. Если поперечные движения цепи (а также кручение) малы, то инерционные силы будут направлены вдоль продольной оси. Отметим, что связь между упругими силами и перемещениями, обусловленными продольными силами, будут определяться законом, имеющим тот же характер, что и закон Гука:

$$\delta_x = E\varepsilon_x = E\frac{\partial u}{\partial x}, \qquad (24)$$

где δ, ε и E являются напряжением, деформацией и модулями Юнга. Можно, в частности, предположить, что общий характер взаимодействий в механической системе сохранится, хотя в первом случае, будет рассматриваться механическая цепь с ограниченным числом степеней свободы, а во втором — упругая балка (рис. 6).

Используя (24), запишем условия равновесия элементарного участка балки между попе-

речными сечениями, расположенными на расстоянии dx друг от друга:

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(EA \frac{\partial u}{\partial x} \right). \qquad (25)$$

Для стержня с постоянным поперечным сечением уравнение (25) примет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \qquad (26)$$

На схеме, представленной на рис. 6, $\delta_x A$ - представляет собой силу, приложенную к выделенному элементарному участку стержня с поперечным сечением А. Если рассматривается механическая цепь, то элементарный участок ассоциируется с фрагментом механической цепи в виде твердого тела (или материальной точки), на который действует упругая сила. При рассмотрении продольного стержня эта упругая сила зависит от координатых, способной изменяться вдоль длины стержня. В случае механической цепи вопрос о том, каковы будут упругие силы, действующие на фрагмент механической цепи, требует дополнительного изучения. Будут ли эти силы зависеть от x (рис. 6), физический смысл которого заключается в том, что упругие силы, действующие на элементарный участок, локализованы, они различны при различных значенияхх, то есть изменяются по длине стержня. Характер перемещений элементарного участка определяется не только временем, но и зависит от того, в каком месте балки он находится. Упомянутая особенность очень важна для изучения совместимости математических моделей, описывающих продольные колебания стержня и механической цепи, состоящей из ограниченного числа элементов.

При рассмотрении математической модели стержня необходимо учитывать граничные условия:

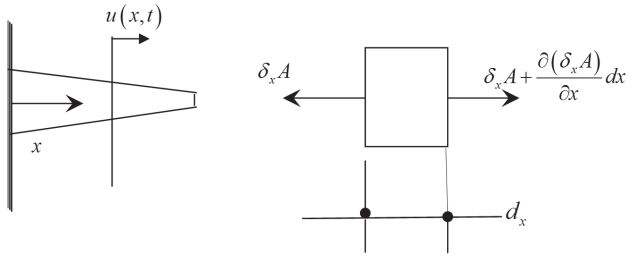


Рис. 6. Принципиальная схема силовых взаимодействий на элементарном участке балки (А – площадь сечения).

- в случае защемленного конца перемещения равны нулю

$$u = 0; \qquad (27)$$

- в случае свободного конца равны нулю напряжения

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0. \qquad (28)$$

Если на конце стержня сосредоточена масса М, то возникающая сила инерции и упругая сила должны находиться в равновесии

$$M \frac{d^2 u}{\partial t^2} + EA \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \qquad (29)$$

если на конце имеется пружина с жесткостью k, то в равновесии должны находиться две упругие силы:

$$ku + EA \frac{\partial u}{\partial x} = 0. \qquad (30)$$

В уравнениях (26), (27) имеются особенности в физической интерпретации u и $\frac{\partial u}{\partial x}$. С одной стороны, u зависит от координаты x и одновременно зависит от времени t; рассматриваемая точка характеризуется координатой x; в этой точке развивается процесс, зависящий от времени. В уравнении (30) учитывается то обстоятельство, что конечная точка стержня через пружину k соединена с неподвижным основанием; в то же время со стороны всего стержня действует сила, формируемая некоторой, условно ее называемой пружиной с жесткостью $\frac{\partial u}{\partial x}$. Параметр $\frac{\partial u}{\partial x}$ изменяется по длине стержня. Можно предполагать, что $\frac{\partial u}{\partial x}$ будет равен некоторой константе, тогда стержень, с учетом таких обстоятельств, будет соответствовать линейной пружине.

Каждое из граничных условий (29), (30), когда оно справедливо, относится <u>только к одному значению величиных</u>, но при любом значении t [1]. Это очень важно, если переходить к системе с конечным числом степеней свободы. Упомянутые граничные условия являются <u>линейно однородными</u>.

III. Имеет смысл несколько отклониться, чтобы сравнить формулировку этой задачи с подобной же задачей, в которой распределе-

ние масс не является непрерывным. Рассмотрим систему, состоящую из n масс, $m_1, m_2, \ldots, m_n$, связанных $n+1$ пружинами, $k_0, k_1, k_2, \ldots, k_n$ в непрерывную цепь. Если все связанные массы могут перемещаться только вдоль прямой линии, причем $u_1, u_2, \ldots, u_n$ являются соответствующими перемещениями, то уравнение движения i-ой массы запишется:

$$m_1 \frac{d^2 u_i}{dt^2} = k_i \left(u_{i+1} - u_i\right) - k_{i-1}\left(u_i - u_{i-1}\right); \quad (31)$$
$$i = 1, 2, \ldots, n.$$

В этом общем выражении u_0 и u_{n+1} являются перемещениями крайних точек двух крайних пружин. Используя обозначения дифференциальных уравнений, получим систему

$$\begin{aligned} &\Delta u_i = u_{i+1} - u_i; \\ &\Delta u_{i-1} = u_i - u_{i-1}; \\ &\Delta\left(k_i \Delta u_i\right) = k_i \Delta u_i - k_{i-1} \Delta u_{i-1}; \end{aligned} \quad (32)$$

отсюда общее уравнение получает вид

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \Delta\left(k_i \Delta u_i\right), \; i = 1, 2, \ldots, n. \quad (33)$$

Если все k равны, то можно записать:

$$\frac{d^2 u_i}{dt^2} = \frac{k}{m_i} \Delta^2 u_i, \; i = 1, 2, \ldots, n. \quad (34)$$

Эти уравнения соответствуют дифференциальным уравнениям в частных производных (25) и (26).

Описание этой системы, так же как и в случае дифференциальных уравнений, неполно, если нет сведений о двух крайних пружинах, которые образуют цепь. Например, если один из концов пружины k_n закреплен, мы можем дополнительно записать, что $u_{n+1} = 0$, а если один из концов пружины полностью свободен, то

$$u_{n+1} - u_n = \Delta u_{n+1} = 0. \quad (35)$$

Эти условия соответствуют граничным условиям дифференциального уравнения в частных производных.

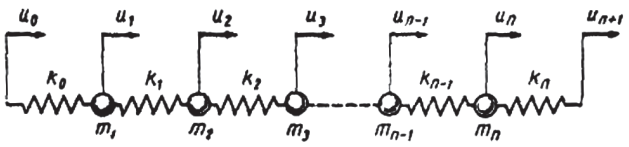


Рис. 7. Механическая цепь с конечным числом степеней свободы.

Однако вернемся к уравнению (33), которое можно переписать в виде

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = k_i \left(u_{i+1} - u_i\right) - k_{i-1}\left(u_i - u_{i-1}\right). \quad (36)$$

Предполагая, что силовые взаимодействия в цепной системе могут выходить за рамки ближайшего окружения m_i, определим значения k_i и k_{i-1} как суммарные жесткости цепочки пружин, находящихся в последовательном соединении и слева и справа от элемента m_i [5]. Уравнение (36) можно переписать в виде

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = -u_i \left(k_i' + k_{i+1}'\right) + k_i'' u_{i+1} + k_{i-1}'' u_{i-1}. \quad (37)$$

Предполагается, что k_i и k_{i+1} могут быть найдены с использованием схем замещения, показанных на рис. 8.

Расчет жесткостей замещения можно представить [5] следующими общими формулами

$$k_i = \frac{\left(\dfrac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}\right) \cdot k_3}{\dfrac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} + k_3} \text{ и т.д., включая } k_i, \quad (38)$$

$$k_{i+1}' = \frac{\left(\dfrac{k_n \cdot k_{n-1}}{k_n + k_{n-1}}\right) \cdot k_{n-2}}{\left(\dfrac{k_n k_{n-1}}{k_n + k_{n-1}}\right) + k_{n-2}} \text{ и т.д., включая } k_i. \quad (39)$$

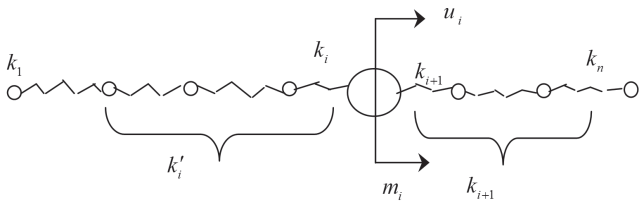


Рис. 8. Схема замещения пружин в цепи.

Что касается второго и третьего членов уравнения (37), то они отражают в соответствии с (37) упругое взаимодействие с элементами по координатам u_{i+1} и u_{i-1}, тогда можно было бы определить приведенные параметры в следующем виде:

$$k''_i = k_i + \frac{\left(\frac{k_{i+1}\cdot k_{i+2}}{k_{i+1}+k_{i+2}}\right)\cdot k_{i+3}}{\left(\frac{k_{i+1}k_{i+2}}{k_{i+1}+k_{i+2}}\right)+k_{i+3}} \text{ и т.д., включая } k_n, \quad (40)$$

$$k''_{i-1} = k_{i-1} + \frac{\left(\frac{k_{i-2}\cdot k_{i-3}}{k_{i-2}+k_{i-3}}\right)\cdot k_{i-4}}{\left(\frac{k_{i-2}k_{i-3}}{k_{i-2}+k_{i-3}}\right)+k_{i-4}}. \quad (41)$$

С учетом приведенных выше обстоятельств уравнение (37) в окончательном виде может быть переписано в виде

$$m_i\frac{d^2u_i}{dt^2} = -u_i\left\{\left\{\frac{\left(\frac{k_1\cdot k_2}{k_1+k_2}\right)k_3}{\left(\frac{k_1k_2}{k_1+k_2}\right)+k_3}u\,m.g.\right\}+\left\{\frac{\left(\frac{k_nk_{n-1}}{k_n+k_{n-1}}\right)k_{n-2}}{\left(\frac{k_n(k_{n-1})}{k_n+k_{n-1}}\right)+k_{n-2}}u\,m.g.\right\}\right\}+$$
$$+u_{i+1}\left\{k_i+\frac{\left(\frac{k_{i+1}k_{i+2}}{k_{i+1}+k_{i+2}}\right)k_{i+3}}{\left(\frac{k_{i+1}k_{i+2}}{k_{i+1}+k_{i+2}}\right)+k_{i+3}}u\,m.g.\right\}+ \quad (42)$$
$$+u_{i-1}\left\{k_{i-1}\frac{\left(\frac{k_{i-2}k_{i-3}}{k_{i-2}+k_{i-3}}\right)k_{i-4}}{\left(\frac{k_{i-2}k_{i-3}}{k_{i-2}+k_{i-3}}\right)+k_{i-4}}u\,m.g.\right\}.$$

Если в качестве примера взять систему с двумя степенями свободы (рис. 9), то

$$\left.\begin{aligned} m_1\frac{d^2u_1}{dt^2}+u_1\left(k_0+\frac{k_1k_2}{k_1+k_2}\right)-u_2(k_1+k_2)=0.\\ m_2\frac{d^2u_2}{dt^2}+u_2\left(k_2+\frac{k_0k_1}{k_0+k_1}\right)-u_1(k_1+k_0)=0.\end{aligned}\right\} \quad (43)$$

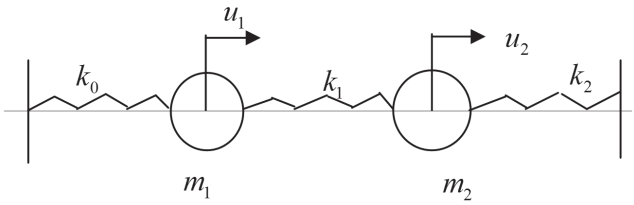


Рис. 9. Расчетная схема цепи с двумя степенями свободы.

Структурная схема эквивалентной в динамическом отношении САУ примет вид, как показано на рис. 10.

Если определить кинетическую энергию системы в виде

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{u}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{u}_2^2, \quad (44)$$

а потенциальную энергию упругих деформаций соответственно в виде

$$\Pi = \frac{1}{2}\left(k_0+\frac{k_1k_2}{k_1+k_2}\right)u_1^2+\frac{1}{2}\left(k_2+\frac{k_1k_0}{k_1+k_0}\right)u_2^2 -$$
$$-\frac{1}{2}(k_1+k_0)u_1^2-\frac{1}{2}(k_1+k_2)\dot{u}_2^2,$$

то использование уравнений Лагранжа II рода приведет к уравнениям, схожим с (39).

Предлагаемый подход основан на представлениях о том, что жесткости упругого взаимодействия элемента механической цепи определяются не только упругими элементами непосредственной близости, но и приведенными значениями жесткостей, которые формируются как последовательные соединения упругих элементов. В такой постановке приведенная жесткость будет зависеть от положения элемента в механической цепи и ее можно экспериментально измерить, построить зависимость, характеризующую закон изменения приведенной жесткости. Этот подход может быть распространен на систему с распределенными параметрами, что в принципе дает возможность найти $u(x)$ аналитическим путем, задавшись соответствующими параметрами распределенной системы (балки, стержня).

Прямое использование для вывода уравнений формализма Лагранжа, естественно

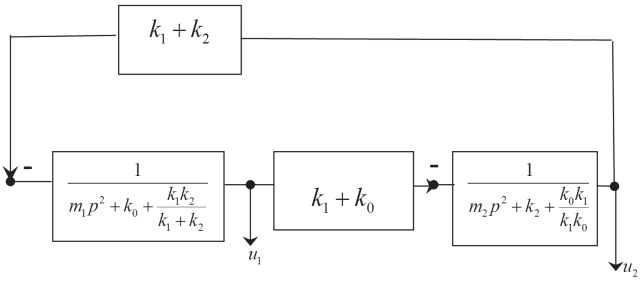


Рис. 10. Структурная схема эквивалентной САУ для расчетной схемы на рис. 9.

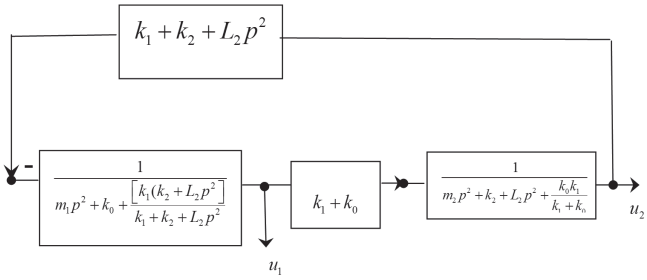


Рис. 11.Структурная схема механической цепи с дополнительной связью $L_2 p^2$ в параллельной связке с k_2.

приводит к другим результатам, так как выражение для потенциальной энергии системы, формируется на основе других предположений, состоятельность которых требует специального рассмотрения. Одним из выводов, проистекающих из сделанных предположений, является асимметрия, которую можно заметить в структуре перекрестных связей на рис. 10. Если ввести дополнительную связь в исходную систему (рис. 9) в виде типового звена двойного дифференцирования $L_2 p^2$, то структурная схема эквивалентной в динамическом соотношении САУ приобретает (рис. 11) ряд особенностей, в частности, при выполнении условия

$$W = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{L_2}}, \qquad (45)$$

которое при блокировании перекрестной связи между u_2 и u_1 при силовом внешнем воздействии может обеспечивать одностороннюю проводимость между парциальными подсистемами.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Ким Н. Тонг Теория механических колебаний. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. Москва. 1963. 353 с.
2. Трубецков Д.И. Введение в синергетику. Колебания и волны. Изд-во УРСС научной и учебной литературы. Москва. 2003. 224 с.
3. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Издательство «Высшая школа». Москва. 1986. 607 с.
4. Киселев В.А. Строительная механика. Стройиздат. Москва. 1976. 511 с.
5. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Об одном подходе определения скорости передачи возмущения в линейных цепных структурах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. Вып. 4(12). Иркутск. 2006. С. 45-52.

Зоркальцев В.И., Казазаева А.В., Мокрый И.В. УДК 519.7:57

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРЕХ ПЕЛАГИЧЕСКИХ ВИДОВ ОРГАНИЗМОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Введение

Экосистема пелагиали озера Байкал характеризуется жесткими пищевыми взаимоотношениями. Главенствующее значение в биоэнергетической трансформации органического вещества в пелагиали озера имеет немногочисленная по числу видов группа организмов. Трофическая цепь этой группы исчерпывается немногими звеньями: фитопланктон — фитофаг эпишура (Epischura baikalensis) — хищный зоопланктон макрогектопус (Macrohectopus branickii) - большая и малая голомянки (Comephorus baicalensis и Comephorus dybowskii) — нерпа. Значительную роль в этой цепи играют популяции большой голомянки, малой голомянки и макрогектопуса, так как именно на них приходится около 65% продукции пелагиали озера [2].

Целью данной работы является систематизация накопленных знаний и верификация имеющихся экспериментальных данных о механизмах взаимодействия между популяциями большой голомянки, малой голомянки и макрогектопуса при помощи математических моделей.

Условно данную работу можно разбить на три части:

- оценка параметров моделируемых популяций в стационарных условиях, т.е. без учета колебаний численности;
- построение автономных моделей численности популяций, расчет точек равновесия популяций;
- оценка параметров моделируемых популяций с учетом колебаний численности, построение модели взаимодействия популяций.

1. Уравнения динамики численности популяции.

Рассмотрим биологическую популяцию, развивающуюся в стационарных внешних условиях. Это означает, что основные характеристики рождаемости и смертности (коэффициенты рождаемости и смертности) принимаются не зависящими от времени. Будем считать, также, что все особи характеризуются только возрастом и усреднены по всем остальным параметрам, в том числе по половому признаку.

Разобьем популяцию на возрастные группы $i=1,\dots,k$ и обозначим $N_1(t),\dots,N_k(t)$ численности популяции в разных возрастных группах в момент времени t. Будем считать, что особи популяции участвуют в процессе размножения только находясь в последней возрастной группе. Время считаем непрерывной переменной. Рассмотрим приращение численностей возрастных групп популяции $\Delta N_1(t),\dots,\Delta N_k(t)$ за некоторый малый промежуток Δt. Приращение первой возрастной группы $\Delta N_1(t)$ складывается из притока численности за счет рождения и оттока численности в связи с гибелью или с переходом во вторую возрастную группу. Считая, что все эти процессы обладают интенсивностью, пропорциональной численности, имеем

$$\Delta N_1(t)=(\rho N_k(t)-\lambda_1 N_1(t)-\theta_1 N_1(t))\Delta t, \qquad (1)$$

где ρ - коэффициент рождаемости последней (половозрелой) группы, λ_1 - коэффициент смертности для первой возрастной группы, θ_1 - интенсивность оттока из первой возрастной группы во вторую.

Приращение численностей всех остальных групп складывается из притока численности из предыдущих возрастных групп и оттока численности связанного с гибелью и переходом в последующие группы:

$$\Delta N_{i+1}(t)=(\theta_i N_i(t)-\lambda_{i+1} N_{i+1}(t)-\theta_{i+1} N_{i+1}(t))\Delta t, \quad i=1,\dots,k-1 \qquad (2)$$

где $\theta_i>0, \lambda_i>0$ параметры модели — интенсивности оттока из возрастной группы i в воз-

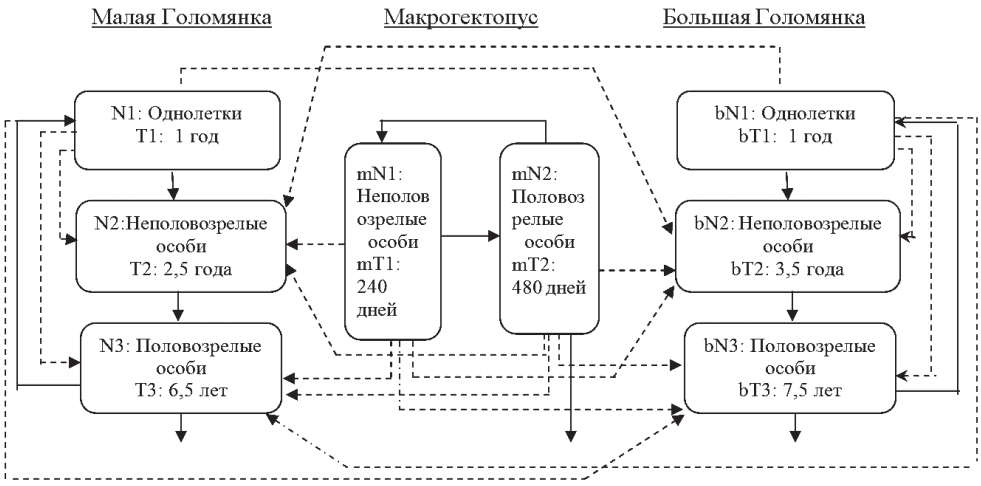


Рис.1. Схема трофических взаимоотношений между возрастными группами макрогектопуса, малой голомянки и большой голомянки. Здесь:

—— **потоки численности, в связи с переходом в другую возрастную группу, рождаемостью и гибелью по старости;**

- - - - **потоки численности, в связи с гибелью за счет выедания.**

растную группу $i+1$ и коэффициент смертности в i-ой возрастной группе.

Разделив обе части равенств (1) и (2) на Δt и перейдя к пределу $\Delta t \to 0$, получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dN_1}{dt} = \rho N_k - \lambda_1 N_1 - \theta_1 N_1,$$

$$\frac{dN_{i+1}}{dt} = \theta_i N_i - \lambda_{i+1} N_{i+1} - \theta_{i+1} N_{i+1},,$$

$$i = 1, \ldots, k-1. \qquad (3)$$

которая описывает динамику численности популяции по всем выделенным возрастным группам.

Исследуемый объект представляют популяции 3-х видов организмов: большая голомянка, малая голомянка и макрогектопус. Структура популяций большой и малой голомянки представлена 3-мя возрастными группами: однолетки — особи в возрасте до года, неполовозрелые и половозрелые особи. Структура популяции макрогектопуса представлена 2-мя возрастными группами: неполовозрелые и половозрелые особи. Взрослые особи голомянок являются хищниками по отношению к собственной молоди и макрогектопусу.

Наглядно схема трофических взаимоотношений популяций рассматриваемых видов представлена на рис.1.

2. Параметризация модели.

Составлению модели предшествует этап оценки и верификации параметров моделируемых популяций. Основными количественными характеристиками процессов воспроизводства и гибели являются коэффициенты рождаемости и смертности. Под коэффициентом рождаемости будем понимать среднее число потомков от одной особи в единицу времени, под коэффициентом смертности будем понимать отношение выбывших из возрастной группы, в связи с гибелью, особей к общему числу особей данной возрастной группы в единицу времени.

Ввиду отсутствия достаточных данных о влиянии факторов окружающей среды на интенсивность процессов жизнедеятельности особей рассматриваемых популяций для оценки параметров примем следующие допущения:

- популяция находится в условиях стационарной среды, т.е. коэффициенты рождаемости ρ и смертности λ_i, $i = 1, \ldots, k$ не зависят от времени;

- популяция находится в состоянии равновесия, т.е. численность каждой возрастной группы не меняется во времени;

- численность особей популяции изменяется по возрасту по экспоненциальному закону.

2.1. Коэффициенты оттока численности.

Согласно допущениям 1 и 2 система (3) примет вид:

$$\rho N_k - \lambda_1 N_1 - \theta_1 N_1 = 0,$$
$$\theta_{k-1} N_{k-1} - \lambda_k N_k - \theta_k N_k = 0,$$
$$i = 1, \ldots, k-1 \qquad (4)$$

Из допущения 3 следует, что численность каждой возрастной группы может быть представлена в виде:

$$N_i = \int_{T_{i-1}}^{T_i} n(T_{i-1}) e^{-\lambda_i \tau} d\tau = n(T_{i-1}) \frac{1 - e^{-\lambda_i (T_i - T_{i-1})}}{\lambda_i},$$
$$i = 1, \ldots, k \qquad (5)$$

где τ - возраст, T_i, T_{i-1} - соответственно верхняя и нижняя границы возраста особи в i-й возрастной группе, $n(T_{i-1})$ - начальная численность особей i-й возрастной группы, λ_i - коэффициент смертности i-й возрастной группы.

Отметим, что $n(T_0) = \rho N_k$.

Тогда из первого уравнения системы (4) и уравнения (5) для случая $i = 1$ получаем

$$n(T_0) - \lambda_1 n(T_0) \frac{1 - e^{-\lambda_1 T_1}}{\lambda_1} - \theta_1 n(T_0) \frac{1 - e^{-\lambda_1 T_1}}{\lambda_1} = 0. \qquad (6)$$

Из (6) следует

$$\theta_1 = \frac{\lambda_1}{e^{\lambda_1 T_1} - 1}, \qquad (7)$$

Аналогично для остальных возрастных групп можно вывести общую формулу коэффициента интенсивности оттока численности из одной возрастной группы в другую:

$$\theta_i = \frac{\lambda_i}{e^{\lambda_i (T_i - T_{i-1})} - 1}, \quad i = 1, \ldots, k \qquad (8)$$

2.2. Коэффициенты рождаемости.

Коэффициенты рождаемости были получены на основе данных из публикаций [2],[4],[6],[7].

Оценки коэффициентов рождаемости для большой и малой голомянок. В работе [6] на стр.113 представлены данные о средней плодовитости голомянок:

- для малой голомянки — 1660 личинок в год,
- для большой голомянки — 2000 личинок в год.

Там же указано, что число участвующих в размножении самок от общего числа самок составляет:

- у малой голомянки — 72%,
- у большой голомянки — 50%.

В работе [9] Коряков Е.А. показал, что самки составляют 50% популяции. Отсюда получим число участвующих в размножении особей от общего числа особей популяции:

- малой голомянки — 36%,
- большой голомянки — 25%.

Таким образом, коэффициент рождаемости одной особи может быть оценен:

- для малой голомянки — ρ^d = 597,6 лич/год на одну особь,
- для большой голомянки — ρ^b = 500 лич/год на одну особь.

Отметим, что нижний индекс у параметров обозначает номер возрастной группы, верхний популяцию: d - малой голомянки; b - большой голомянки; m - макрогектопуса.

Оценка коэффициента рождаемости для популяции макрогектопуса. В работе [7] представлены данные о динамике роста и плодовитости макрогектопуса. По этим данным можно сделать предположение, что самка макрогектопуса живет около 480 дней. В возрасте 180-240 дней самка вырастает до размера 14-16 мм и способна плодоносить (таблица 1).

Предположим, что самка макрогектопуса плодоносит один раз в течение жизни, тогда среднее количество яиц принесенное одной самкой в год, при времени жизни 480 дней (1,315 года) определяется интервалом — от 145 до 217 шт/год.

Процент самцов в популяции макрогектопуса колеблется в интервале от 5 до 39 % [10]. Пересчитывая границы интервала, определяющего среднее количество яиц в год, для усредненной особи ρ^m, получим от 87 до 206 шт/год.

Табл. 1.

Зависимость между размерами самок и количеством яиц *Macrohectopus branickii* **(Dyb.)**

	16-21 мм	21-26 мм	26-29 мм	29-33 мм	Итого
Среднее кол-во яиц за один раз (шт)	88	147	168	362	191
Максимальное кол-во яиц за один раз (шт)	113	166	196	565	285

2.3.Коэффициенты смертности.

Методика оценки коэффициентов смертности. Рассмотрим динамику возрастного состава популяции. Следуя [3, § 8.1] в качестве основной характеристики возрастного состава популяции рассмотрим возрастную плотность численности - функцию двух аргументов $n(\tau,t)$, где τ- возраст, $\tau \in [0,T]$, T- максимальный возраст особи, t- время, $t \in [0,\infty)$. Численность особей с возрастом от τ_1 до τ_2 в момент времени t определяется по формуле

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} n(\tau,t)d\tau \qquad (9)$$

Плотностью рождаемости $P(\tau,t)$ называется такая функция возраста и времени, что для любых двух возрастов τ_1,τ_2, и моментов времени t_1, t_2 число новорожденных особей, порожденных родителями с возрастом, $\tau \in [\tau_1,\tau_2]$ за время $t \in [t_1,t_2]$, равно

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2}\int_{t_1}^{t_2} P(\tau,t)d\tau dt \qquad (10)$$

Аналогично плотностью смертности $\Lambda(\tau,t)$ называется функция возраста и времени, такая, что число особей, погибших за время $t \in [t_1,t_2]$, с возрастом $\tau \in [\tau_1,\tau_2]$ есть

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2}\int_{t_1}^{t_2} \Lambda(\tau,t)d\tau dt \qquad (11)$$

Согласно допущению 1 величины плотности рождаемости и плотности смертности могут быть представлены в следующем виде:

$$P(\tau,t)=\rho(\tau)n(\tau,t),$$
$$\Lambda(\tau,t)=\lambda(\tau)n(\tau,t),$$

где $\rho(\tau)$ и $\lambda(\tau)$ - соответственно коэффициенты рождаемости и смертности в популяции.

Динамику численности популяции описывает система уравнений:

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial n}{\partial t}+\frac{\partial n}{\partial \tau}=-\lambda(\tau)n(\tau,t)\\&n(0,t)=\int_0^T \rho(\tau)n(\tau,t)d\tau\end{aligned}\right\}, \qquad (12)$$

при заданных начальных условиях $n(\tau,0)$. Подробный вывод системы представлен в [3, § 8.2].

Поясним физический смысл уравнений данной системы. Первое уравнение называется уравнением выживаемости (гибели). Его можно трактовать как уравнение «неразрывности». Т.е. за некоторый временной интервал все особи вошедшие в некоторый возрастной интервал должны его покинуть. Второе уравнение называется уравнением рождаемости. Численность популяции в момент времени t образуется суммированием всей рождаемости как по времени так и по всем возрастам родителей.

Согласно допущению 2, численность популяции неизменна во времени, т.е.

$$n(\tau,t)=n(\tau).$$

Тогда система уравнений (12) принимает вид

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial n}{\partial \tau}=-\lambda(\tau)n(\tau)\\&n(0)=\int_0^T \rho(\tau)n(\tau)d\tau\end{aligned}\right\}. \qquad (13)$$

Рассмотрим как связаны между собой коэффициенты рождаемости и смертности.

Примем следующую гипотезу - пусть функция рождаемости определяется тремя параметрами: временем полового созревания, периодом репродуктивного периода и постоянным коэффициентом репродуктивности. На основании этого функция рождаемости примет вид :

$$\rho(\tau)\begin{cases}0, & \tau \in [0,T_{k-1})\\ \rho, & \tau \in [T_{k-1},T_k],\end{cases} \qquad (14)$$

где ρ — коэффициент рождаемости; T_{k-1} - время роста особи до половозрелого состояния; T_k - время жизни особи.

Рассмотрим случай, когда коэффициент смертности $\lambda(\tau)$ - функция кусочно-постоянная

$$\lambda(\tau)=\begin{cases}\lambda_1, & \tau \in [0,T_1)\\ \lambda_2, & \tau \in [T_1,T_k].\end{cases}$$

Тогда

$$n(\tau)=\begin{cases}n(0)e^{-\lambda_1\tau}, & \tau \in [0,T_1),\\ n(0)e^{-\lambda_1 T_1-\lambda_2(\tau-T_1)}, & \tau \in [T_1,T_k].\end{cases} \qquad (15)$$

Уравнение рождаемости системы (13) примет вид

$$n(0)=\int_0^{T_k} n(\tau)\rho(\tau)d\tau=\rho\int_{T_{k-1}}^{T_k} n(\tau)d\tau=$$

$$=\rho\int_{T_{k-1}}^{T_k} n(0)e^{-\lambda_1 T_1}e^{-\lambda_2(T_{k-1}-T_1)}e^{-\lambda_2(\tau-T_{k-1})}d\tau=$$

$$= \frac{n(0)e^{-\lambda_1 T_1} e^{\lambda_2 T_1} \rho}{\lambda_2} (e^{-\lambda_2 T_{k-1}} - e^{-\lambda_2 T_k}),$$

откуда

$$e^{\lambda_1 T_1} = e^{\lambda_2 T_1} \rho \frac{e^{-\lambda_2 T_{k-1}} - e^{-\lambda_2 T_k}}{\lambda_2}. \qquad (16)$$

Логарифмируя, получаем соотношение

$$\lambda_1 = \lambda_2 + \frac{1}{T_1} \ln(\rho \frac{e^{-\lambda_2 T_{k-1}} - e^{-\lambda_2 T_k}}{\lambda_2}). \qquad (17)$$

В случае постоянного коэффициента смертности на всем промежутке жизни особи, $\lambda(\tau)$ — постоянная величина.

$$\lambda(\tau) = \lambda, \ \ \tau \in [0, T_k].$$

Функция плотности численности $n(\tau)$ выражается следующим образом

$$n(\tau) = n(0)e^{-\lambda\tau}, \ \tau \in [0, T_k] \qquad (18)$$

Формула (16) примет вид

$$\rho = \frac{\lambda}{e^{-\lambda T_{k-1}} - e^{-\lambda T_k}}. \qquad (19)$$

Таким образом, получены соотношения (16),(18) связывающие воедино четыре параметра: коэффициент рождаемости ρ, коэффициент смертности λ_i, $i = 1,\ldots,k$, время начала репродуктивного периода T_{k-1} и время жизни особи T_k.

Оценки коэффициентов смертности для групп неполовозрелых и половозрелых особей большой и малой голомянок. В табл.2, табл.3 и на рис.2 представлены данные о процентном соотношении численности особей в определенном возрасте для каждой из популяций голомянок из работы [4] Старикова Г.В. В течение 7 лет с 1969 по 1975 гг. согласно разработанной им методике производился лов. В каждом улове в процентном отношении к общему количеству особей в улове подсчитывалась численность особей достигших определенного возраста. Стариковым Г.В. было выделено 6 основных возрастов (таблицы 2 и 3).

На основании данных из табл.2 и табл.3 были получены усредненные значения для возрастного состава в процентах (табл. 4).

На основании полученных данных построены кривые представленные на рис.3.

На графиках видно, что кривая возрастного состава для обоих видов голомянок близка к

Табл. 2.

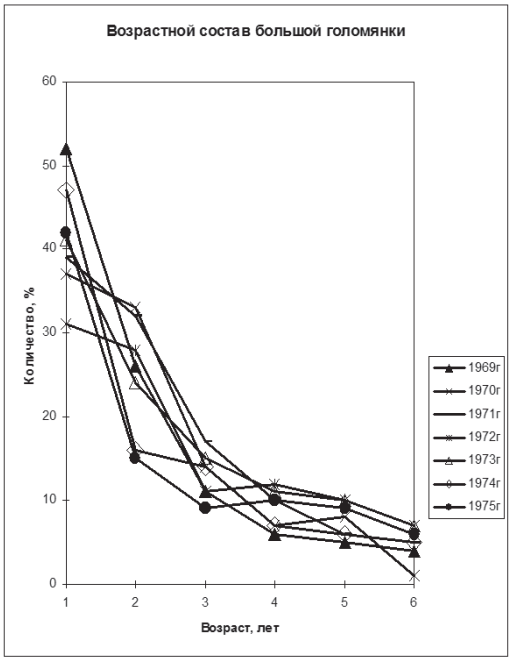
Возрастной состав большой голомянки (в процентном соотношении к общему числу особей).

Возраст	1969 г.	1970 г.	1971 г.	1972 г.	1973 г.	1974 г.	1975 г.
1	52	37	39	31	41	47	42
2	26	33	32	28	24	16	15
3	11	14	17	11	15	14	9
4	6	7	10	12	11	7	10
5	5	8	6	10	10	6	9
6	4	1	5	7	7	5	6

Табл. 3.

Возрастной состав малой голомянки (в процентном соотношении к общему числу особей).

Возраст	1969 г.	1970 г.	1971 г.	1972 г.	1973 г.	1974 г.	1975 г.
1	32	79	39	42	56	47	52
2	28	17	37	34	32	28	29
3	24	9	12	20	14	11	10
4	13	5	7	8	9	12	11
5	7	3	7	6	6	8	2
6	3	2	3	2	2	1	1



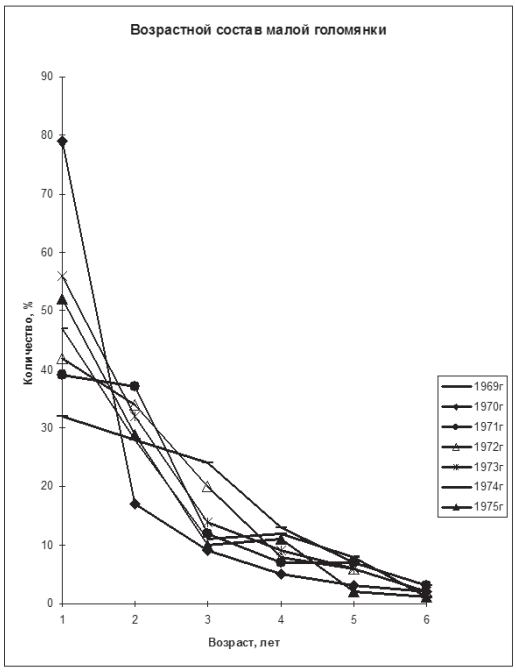


Рис.2. Графики процентного соотношения рыб разных возрастов для популяций большой и малой голомянок соответственно.

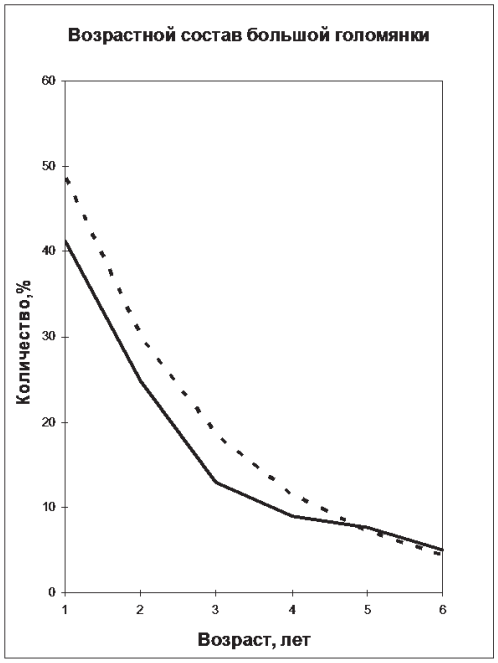
Табл. 4.

Усредненный за период 1969 – 1975гг. возрастной состав большой и малой голомянки (в процентном соотношении к общему числу особей в популяции).

Возраст	Большая голомянка	Малая голомянка
1	41,3	49,6
2	24,9	29,3
3	13	14,3
4	9	9,3
5	7,7	5,6
6	5	2

экспоненте. Приняв гипотезу о том, что кривая возрастного состава описывается функцией $e^{-\lambda\tau}$, где λ — коэффициент смертности, а τ — возраст, усредненные кривые возрастного состава были прологарифмированы и методом наименьших квадратов были получены следующие оценки коэффициентов смертности: для малой голомянки $\lambda_2^d = \lambda_3^d = 0{,}68$; для большой голомянки $\lambda_2^b = \lambda_3^b = 0{,}48$.

Оценки коэффициентов смертности для однолеток голомянок. Положим что коэффициент смертности однолеток голомянок отличен от коэффициента смертности взрослых особей. Ранее были получены оценки коэффициентов рождаемости: для малой голомянки — ρ^d = 597,6 лич/год; для большой голомянки — ρ^b = 500 лич/год, и коэффициентов смертности для взрослых особей: для малой голомянки $\lambda_2^d = \lambda_3^d = 0{,}68$; для большой голомянки $\lambda_2^b = \lambda_3^b = 0{,}48$. Время начала репродуктивного периода и время жизни особи оценивается в работе [4]: для малой голомянки -$T_{k-1}^d = 2{,}5$ года, $T_k^d = 6{,}5$ лет; для большой голомянки - $T_{k-1}^b = 3{,}5$ года, $T_k^b = 7{,}5$. Время жизни однолеток разными авторами оценивается по разному — 10 месяцев, 11 месяцев или 12 месяцев.



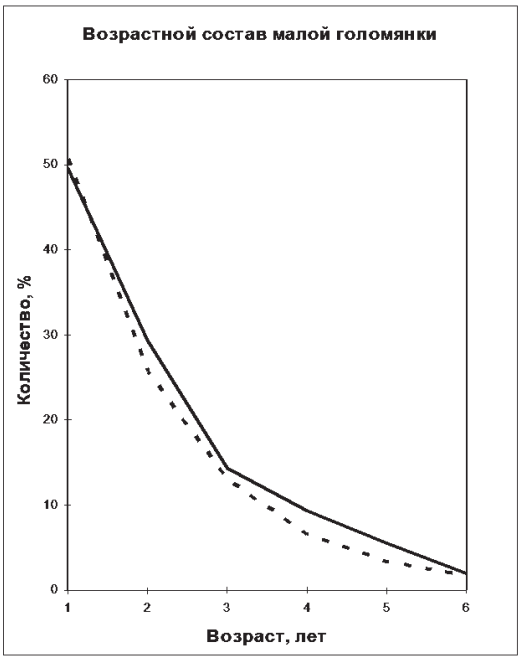


Рис.3. Кривые среднегодового возрастного состава для популяций большой и малой голомянок соответственно (аналитический и эмпирический варианты). Здесь:
- - - - - - По формуле $e^{-\lambda\tau}$ 100%, где $\tau = 1,\ldots,6$, $\lambda = 0{,}48$-для большой голомянки, $\lambda = 0{,}68$- для малой голомянки;
——— Среднее арифметическое рядов данных.

Табл. 5.

Результаты расчета коэффициента смертности однолеток большой и малой голомянок λ_1 (1/*rog*).

	Вариации возраста однолеток T_1 (*rog*)		
	0,833	0,926	1
λ_1^b большой голомянки	6,269	5,688	5,302
λ_1^d малой голомянки	6,252	5,692	5,321

Для оценки коэффициентов смертности возрастной группы однолеток популяций большой и малой голомянок воспользуемся формулой (16) (табл. 5).

Как видно из таблицы 5, значения коэффициентов смертности для возрастной группы сеголеток большой и малой голомянок оказались практически равны между собой.

Так как сеголетки обоих видов голомянок имеют одинаковый размер и единую среду обитания, а, следовательно, подвержены влиянию одних и тех же факторов, разумно предположить, что они будут обладать одинаковым коэффициентом смертности. Это рассуждение является косвенным подтверждением в правильности полученных оценок. Далее значение коэффициента смертности однолеток голомянок будет равно $\lambda_1^b = \lambda_1^d = 5{,}69$.

Оценка коэффициента смертности для популяции макрогектопуса. Для оценки коэффициента смертности популяции макрогектопуса применялись два независимых метода. Первый метод — расчет по формуле (19), второй — анализ данных публикаций [6] и [7].

Метод 1.

Воспользуемся данными приведенными в работе [7]:

- время жизни особи $T_k = 1{,}315$ года;

- время начала репродуктивности от 180 дней ($T_{k-1} = 0{,}49$) до 240 дней ($T_{k-1} = 0{,}657$).

Применим соотношение (19) для расчета коэффициента смертности популяции макро-

Табл. 6.

Результаты расчета коэффициента смертности для макрогектопуса λ^m (1/*год*).

T_{k-1} \ ρ	87 (яиц/год)	206 (яиц/год)
0,657 год	4,4	5,5
0,49 год	5,6	6,9

гектопуса. Так как мы располагаем только интервальными оценками репродуктивности и времени начала репродуктивного периода, расчеты произведены для граничных значений интервалов (таблица 6)

Метод 2.

В работе [6] на стр.95 говорится о том, что во всех уловах за период июнь — ноябрь 1973г. преобладали мелкие особи. Размерная группа рачков длиной до 5 мм составляла 85% - 95% общей численности.

Поскольку известно, что размеры самцов никогда не превосходят 5.5мм, следовательно, оставшиеся 5% - 15% приходятся исключительно на самок, а их количество не ниже 50% популяции (эта оценка несколько занижена, по данным [7] процент самцов колеблется на уровне 9-16, а максимальное значение равно 39). Таким образом, из 50% самок только 5-15 % имеет размер более 5мм, а 35-45 % - менее 5мм

Рост самок начинается от 1мм и достигает размера 14-16 мм в течение 180-240 дней, при этом она совершает 10-13 линек [7]. Первые линьки 5-6 дней, последующие 10-13 (в среднем 8 дней на линьку). Предполагая линейную зависимость размера от возраста, получим, что самка макрогектопуса достигает размера 5 мм примерно за 51-68 дней. Таким образом, от 35% до 45% численности самок приходятся на первые 60 дней жизни (рост до 5мм).

Примем гипотезу о едином коэффициенте смертности для всей популяции макрогектопуса, тогда численность самок размером до 5 мм можно записать в виде интеграла:

$$N_1^m = \int_0^{T_1} N_0 e^{-\lambda\tau} d\tau = N_0 \left.\frac{e^{-\lambda\tau}}{-\lambda}\right|_0^{T_1} = N_0 \frac{e^{-\lambda T_1} - 1}{-\lambda},$$

а численность самок больше 5 мм:

$$N_2^m = \int_{T_1}^{T_2} N_0 e^{-\lambda\tau} d\tau = N_0 \left.\frac{e^{-\lambda\tau}}{-\lambda}\right|_{T_1}^{T_2} = N_0 \frac{e^{-\lambda T_2} - e^{-\lambda T_1}}{-\lambda},$$

где T_1 - время роста самки макрогектопуса до 5мм;

T_2 - время жизни самки макрогектопуса;

λ - коэффициент смертности.

Рассмотрим отношение численностей обеих групп самок

$$\frac{N_1^m}{N_2^m} = \frac{e^{-\lambda T_1} - 1}{e^{-\lambda T_2} - e^{-\lambda T_1}} = \frac{e^{\lambda T_1} - 1}{1 - e^{-\lambda(T_2 - T_1)}}.$$

Положим, что $T_2 - T_1 > 1$ и $\lambda > 5$. Тогда

$$e^{-\lambda(T_2 - T_1)} < e^{-5} < 0{,}00673794.$$

Т.е. уменьшение знаменателя очень мало и мы можем принять его равным 1, и следовательно:

$$\frac{e^{\lambda T_1} - 1}{1 - e^{-\lambda(T_2 - T_1)}} \approx e^{\lambda T_1} - 1$$

Тогда значение коэффициента смертности λ может быть рассчитано следующим образом:

Рассмотрим случай, когда самка достигает половозрелого состояния за 51 день, тогда

$$T_1 = \frac{51}{365} = 0{,}1397.$$

Пусть также самки менее 5 мм составляют 35%, а самки более 5 мм — 15% от всех особей, тогда их отношение равно $e^{\lambda T_1} - 1 = \frac{35}{15} = 2{,}333$, отсюда получаем $\lambda = \frac{\ln(3{,}333)}{0{,}1397} = 8{,}618.$

В таблице 7 приведены результаты расчета коэффициента смертности макрогектопуса для граничных значений параметров времени роста самок до 5мм и статистических данных о процентном составе размерных групп до 5мм и после 5мм (таблица 7).

Таким образом, минимальное значение коэффициента смертности для самок макрогектопуса оцененное по данным [6,7] будет $\lambda = 6{,}4729$. Эта оценка достаточно близка к результатам предыдущего расчета представленным в табл. 6.

Если рассматривать всю популяцию, то число особей погибших в связи с достижением предельного возраста, очень мало, таким образом, значение коэффициента смертности очень близко к значению Р/В-коэффициента,

Табл. 7.

Результаты расчета коэффициента смертности для популяции макрогектопуса.

Время жизни неполовозрелых особей (T_1) в годах	Процент самок среди особей до 5 мм	Процент самок среди особей больше 5 мм	λ коэфф. смертности
0,1397 (51 день)	45	5	15,728
0,186 (68 дней)	45	5	11,813
0,1397 (51 день)	35	15	8,618
0,186 (68 дней)	35	15	6,4729

равному отношению продукции популяции к ее биомассе.

Отметим, что в [2] фактически приведены противоречивые данные для макрогектопуса (стр.511-512). Здесь выедание макрогектопуса рыбами (673 тыс.т) в два раза превосходит цифру его продукции (330 тыс.т). В этом же источнике на стр.519 приведен общий запас его биомассы в озере, равный 110 тыс.т., т.е. Р/В-коэффициент, а также коэффициент смертности равен 3.

Если принять гипотезу о едином коэффициенте смертности λ для всей популяции макрогектопуса, то его значение практически совпадает со значением Р/В-коэффициента, которое может быть оценено как 6. Тогда продукция будет равна 6*110 тыс.т. = 660тыс.т., что соответствует количеству макрогектопуса, выедаемого другими рыбами. Данный факт является дополнительным подтверждением правильности оценки коэффициента смертности макрогектопуса равного 6.

Исходя из принадлежности рачков макрогектопуса и однолеток голомянок к одной размерной группе и напряженных трофических взаимоотношений в пелагиали мы можем принять гипотезу о едином коэффициенте смертности для этих организмов - $\lambda_1 = 5{,}69$.

3. Автономные модели.

Модель взаимодействующих популяций макрогектопуса, большой и малой голомянок основывается на трех автономных моделях. Каждая из автономных моделей описывает равновесное состояние популяции. Коэффициенты рождаемости и смертности заданы константами, т.е. не учитываются колебания численности взаимодействующих популяций. Значения численностей, полученные в точке равновесия каждой автономной модели, являются начальными условиями для модели взаимодействующих популяций, которая будет формироваться в следующем разделе.

Модель популяции большой голомянки. Согласно (3) динамика численности популяции описывается следующей системой:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1^b}{dt} &= \rho^b N_3^b - \lambda_1 N_1^b - \theta_1^b N_1^b, \\ \frac{dN_2^b}{dt} &= \theta_1^b N_1^b - \lambda_2^b N_2^b - \theta_2^b N_2^b, \\ \frac{dN_3^b}{dt} &= \theta_2^b N_2^b - \lambda_3^b N_3^b - \theta_3^b N_3^b. \end{aligned} \qquad (20)$$

Параметры модели рассчитаны в п.2:

$$\rho^{b^*} = 500;\ \lambda_1^* = 5{,}69;\ \lambda_2^{b^*} = 0{,}48;\ \lambda_3^{b^*} = 0{,}48;$$
$$\theta_1^b = 0{,}0295;\ \theta_2^b = 0{,}1472;\ \theta_3^b = 0{,}11.$$

Значения численностей $N_1^{b^*}$, $N_2^{b^*}$, $N_3^{b^*}$ в точке равновесия были получены по формулам:

$$N_1^{b^*} = N_0^b \frac{1 - e^{-\lambda_1 T_1^b}}{\lambda_1},$$

$$N_2^{b^*} = N_0^b e^{-\lambda_1 T_1^b} \frac{1 - e^{-\lambda_2^b (T_2^b - T_1^b)}}{\lambda_2^b},$$

$$N_3^{b^*} = N_0^b e^{-\lambda_1 T_1^b - \lambda_2^b (T_2^b - T_1^b)} \frac{1 - e^{-\lambda_3^b (T_3^b - T_2^b)}}{\lambda_3^b},$$

где $T_1^b = 1$ - предельный возраст однолеток; $T_2^b = 3{,}5$ - возраст начала половой зрелости; $T_3^b = 7{,}5$ - время жизни особи; $N_0^b = 51{,}204$ особей под кв.м в год — начальная численность, получена на основе данных [2].

$N_1^{b^*} = 10{,}33; N_2^{b^*} = 0{,}326; N_3^{b^*} = 0{,}12.$

Модель популяции малой голомянки. Динамика численности популяции малой голомянки описывается следующей системой:

$$\frac{dN_1^d}{dt} = \rho^d N_3^d - \lambda_1 N_1^d - \theta_1^d N_1^d,$$
$$\frac{dN_2^d}{dt} = \theta_1^d N_1^d - \lambda_2^d N_2^d - \theta_2^d N_2^d, \qquad (21)$$
$$\frac{dN_3^d}{dt} = \theta_2^d N_2^d - \lambda_3^d N_3^d - \theta_3^d N_3^d$$

Параметры модели рассчитаны в п.2:

$$\rho^{\cdot} = 597;\ \lambda_1^{\cdot} = 5{,}69;\ \lambda_2^{d\cdot} = 0{,}68;\ \lambda_3^{d\cdot} = 0{,}68;$$
$$\theta_1^d = 0{,}0261;\ \theta_2^d = 0{,}2348;\ \theta_3^d = 0{,}0694.$$

Значения численностей $N_1^{d\cdot}$, $N_2^{d\cdot}$, $N_3^{d\cdot}$ в точке равновесия были получены по формулам:

$$N_1^{d\cdot} = N_0^d \frac{1-e^{-\lambda_1 T_1^d}}{\lambda_1},$$
$$N_2^{d\cdot} = N_0^d e^{-\lambda_1 T_1^d} \frac{1-e^{-\lambda_2^d (T_2^d - T_1^d)}}{\lambda_2^d},$$
$$N_3^{d\cdot} = N_0^d e^{-\lambda_1 T_1^d - \lambda_2^d (T_2^d - T_1^d)} \frac{1-e^{-\lambda_3^d (T_3^d - T_2^d)}}{\lambda_3^d},$$

где $T_1^d = 1$ - предельный возраст однолеток; $T_2^d = 2{,}5$ - возраст начала половой зрелости;, $T_3^d = 6{,}5$ - время жизни особи; $N_0 = 251{,}559$особей под кв.м в год — начальная численность, получена на основе данных [2].

$$N_1^{d\cdot} = 37{,}33; N_2^{d\cdot} = 0{,}675; N_3^{d\cdot} = 0{,}36.$$

Модель популяции макрогектопуса. Динамику численности популяции макрогектопуса описывает система:

$$\frac{dN_1^m}{dt} = \rho^m N_2^m - \lambda_1 N_1^m - \theta_1^m N_1^m,$$
$$\frac{dN_2^m}{dt} = \theta_1^m N_1^m - \lambda_1 N_2^m - \theta_2^m N_2^m. \qquad (22)$$

Параметры модели рассчитаны в п.2:

$$\rho^{m\cdot} = 272{,}059;\ \lambda_1^{\cdot} = 5{,}69;\ \theta_1 = 0{,}1249;\ \theta_2 = 0{,}1531;$$

Значения численностей $N_1^{m\cdot}$, $N_2^{m\cdot}$ в точке равновесия были получены по формулам:

$$N_1^{m\cdot} = N_0^m \frac{1-e^{-\lambda_1 T_1^m}}{\lambda_1},$$
$$N_2^{m\cdot} = N_0^m e^{-\lambda_1 T_1^m} \frac{1-e^{-\lambda_1 (T_2^m - T_1^m)}}{\lambda_1},$$

где $T_1^m = 0{,}657$ - предельный возраст особей не достигших половой зрелости; $T_2^m = 1{,}315$ - время жизни особи; $N_0^m = 3625{,}32$ особей под кв.м в год — начальная численность, получена на основе данных [2].

$$N_1^{m\cdot} = 227{,}35; N_2^{m\cdot} = 4{,}85.$$

4. Модель динамики численности взаимодействующих популяций макрогектопуса, большой голомянки и малой голомянки.

Взаимодействие между популяциями реализовано в модели через изменение коэффициента смертности жертв (однолетки голомянок и макрогектопус) и коэффициента рождаемости хищников (взрослых особей голомянок), т.е. учитываются колебания численностей популяций.

Коэффициент смертности жертв. Известно, что на долю малой голомянки приходится 69,8 % продукции макрогектопуса, на долю большой — 22,3%, а на долю других рыб — 7,8% [8]. Так как раннее мы приняли гипотезу о едином коэффициенте смертности для однолеток голомянок и для макрогектопуса, то можем распространить эти проценты и на однолеток голомянок. Для модели это означает, что коэффициент смертностиλ_1 уже не является константой, а находится в линейной зависимости от численности второй и третьей возрастных групп голомянок:

$$\lambda_1 = \lambda_1^{\cdot}\left(0{,}223 \frac{N_2^b + N_3^b}{N_2^{b\cdot} + N_3^{b\cdot}} + 0{,}078 + 0{,}698 \frac{N_2^d + N_3^d}{N_2^{d\cdot} + N_3^{d\cdot}}\right),$$

где $N_2^{b\cdot}, N_3^{b\cdot}, N_2^{d\cdot}, N_3^{d\cdot}$, - численности старших возрастных групп в равновесном состоянии для большой и малой голомянок соответственно.

Коэффициент рождаемости хищников. Примем допущение, что репродуктивность особи пропорциональна рациону, т.е. количеству употребленной пищи. Тогда коэффициент рождаемости для большой и малой голомянок рассчитывается по следующим формулам:

$$\rho^b = \rho^{b^*}(0{,}37\frac{N_1^d + N_1^b}{N_1^{d^*} + N_1^{b^*}} + 0{,}63(\frac{N_1^m + N_2^m}{N_1^{m^*} + N_2^{m^*}})),$$

$$\rho = \rho^*(0{,}07\frac{N_1^d + N_1^b}{N_1^{d^*} + N_1^{b^*}} + 0{,}93(\frac{N_1^m + N_2^m}{N_1^{m^*} + N_2^{m^*}})).$$

Здесь коэффициенты несут следующий смысл: 0,07 — это доля рыбной пищи (однолеток большой и малой голомянок в рационе малой голомянки), 0,93 — соответственно доля макрогектопуса в рационе малой голомянки; 0,37 — это доля рыбной пищи (однолеток большой и малой голомянок в рационе большой голомянки), 0,63 — соответственно доля макрогектопуса в рационе большой голомянки.

Известно, что рацион малой голомянки составляют рачки макрогектопуса и однолетки голомянок. В литературе имеются данные о процентных соотношениях: однолетки составляют 25% рациона малой голомянки, а рачки макрогектопуса — 68% [8]. Для большой голомянки в рационе 60% однолеток и 33,5% макрогектопуса. Кроме того, известно, что всего обе голомянки вместе потребляют 608 тыс.т. макрогектопуса (461 тыс.т. потребляется малой голомянкой и 147 тыс.т. — большой голомянкой) и 78 тыс.т. рыбной пищи (однолеток) [2]. Очевидно, что использовать данные пропорции в чистом виде невозможно, поэтому будем использовать некоторые отношения данных пропорций, т.е. доля однолеток, которые потребляет малая голомянка составит 29% от общего количества рыбной пищи, на долю большой голомянки соответственно остается — 71%.

Рачки макрогектопуса и однолетки голомянок обладают разной энергетической ценностью, поэтому для правильной оценки их соотношений в рационе голомянок необходимо преобразовать их сырой вес в вес С-органический. Для коэффициентов преобразования сырого веса в вес С-орг для разных организмов приняты следующие значения: 0,05 - для макрогектопуса; 0,08 - для сеголеток малой голомянки; 0,08 - для сеголеток большой голомянки. В результате можно получить соотношение однолеток и макрогектопуса в рационе малой голомянки:

- доля однолеток обоих видов голомянок - $\frac{78 * 0{,}29 * 0{,}08}{461 * 0{,}05 + 78 * 0{,}08 * 0{,}29} = 0{,}07;$
- доля макрогектопуса, соответственно — 0,93.

Аналогичным образом можно получить пропорции рациона и для большой голомянки:

- доля однолеток обоих видов голомянок - $\frac{78 * 0{,}71 * 0{,}08}{147 * 0{,}05 + 78 * 0{,}08 * 0{,}71} = 0{,}37;$
- доля макрогектопуса, соответственно — 0,63.

5. Поведение модели.

Полученная модель описывает динамику численности популяций с учетом межпопуляционных взаимодействий. Расчеты показали, что поведение модели устойчиво, после возмущений сходится к равновесному состоянию. Точка равновесия соответствует численностям популяций, выбранным в автономных моделях популяций, т.е. не отмечено вытеснение одного вида другим.

Соотношения численностей популяций макрогектопуса, большой и малой голомянок близки к имеющимся экспериментальным данным. В частности, по данным [2] численность малой голомянки в разные годы составляла от 22 до 41 млрд.экз., в то время как численность большой голомянки изменялась от 7 до 10 млрд.экз. Таким образом в среднем, соблюдается отношение численностей малой и большой голомянок как 3/1, что хорошо видно на рис. 4

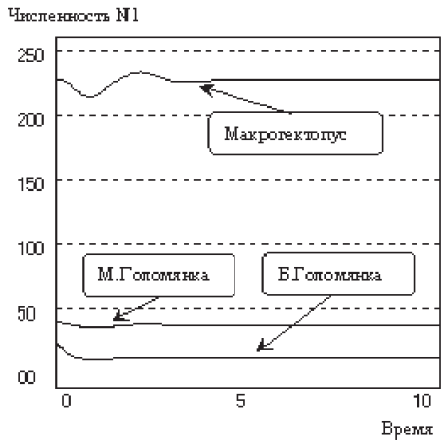


Рис.4. Динамика численностей популяций.

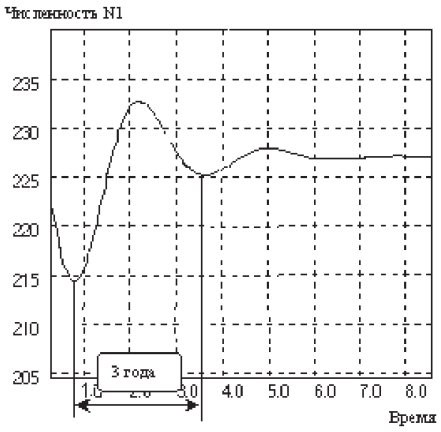


Рис.5. Колебания численности на примере однолеток малой голомянки.

Расчеты на модели представленные на рис.5, что период колебаний численности составляет около 3 лет. Известно, что экосистема всей пелагиали колеблется с периодом около 3,5 лет [1].

Таким образом, поведение модели оценивается как достаточно близкое к поведению реальной экосистемы, по имеющимся экспериментальным данным и оценкам.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Круговорот органического вещества в озере Байкал./ Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И.-Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1975, 189с.
2. Атлас и определитель пелагобионтов Байкала (с краткими очерками по их экологии) / О.А. Тимошкин, Г.Ф. Мазепова, Н.Г. Мельник и др. - Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 695с.
3. Динамическая теория биологических популяций./под ред. Р.А.Полуэктова. М.:Наука, ГР физ. — мат.лит.,1974 , 456с.
4. Голомянки Байкала / Стариков Г.В., Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1977, 93с.
5. Казазаева А.В., Мокрый И.В. Оценка коэффициентов рождаемости и смертности некоторых видов организмов пелагиали оз.Байкал. // "Оптимизация, управление, интеллект", Иркутск, №12, 2006, С. 127-137.
6. Биологическая продуктивность пелагиали Байкала и ее изменчивость./Афанасьева Э.Л., Бекман И.В., Волерман И.В., Коряков Е.А., Мамонтов А.М., Поповская Г.И. Смирнов В.В., Смирнов-Залуми Н.С., Сорокина А.А., Сорокин В.Н., Стариков Г.В., Шимараев М.Н. - Новосибирск: Наука, Сиб. Отд-ние,1977. - 256с.
7. Николаева Е.П. «Некоторые данные к биологии размножения пелагического байкальского бокоплава Macrohectopus branickiy»//Известия биолого-географического института при ИГУ, 1967,т.20, С.28-33
8. Коряков Е.А. Некоторые экологические приспособления в размножении голомянок (Pisces, Comephoridae). // Доклады Академии наук СССР, 1956, том 111, № 5, С.1111-1114.
9. Коряков Е.А. О плодовитости и типе нерестовой популяции у голомянок (Pisces, Comephoridae). // Доклады Академии наук СССР, 1955, том 101, № 5, С. 965-967.

Белоусов К.Н., Бутырин О.В., Носков С.И. УДК 519.862

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРТИЗЫ В РЕШЕНИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Важнейшей и, по-видимому, классической проблемой теории принятия решений является проблема оценивания взвешивающих параметров (коэффициентов) свертки локальных критериев в некий единый агрегат. Анализ требований к методическому обеспечению построения процедуры оценивания показывает, что ее разработка должна предполагать необходимость: проведения тщательного анализа ретроспективной информации с ее разделением на количественную и качественную; детальный анализ внешних и внутренних условий функционирования объекта оценки; формирования группы экспертов-профессионалов из специалистов, знакомых с объектом исследования и способных оценить все основные стороны рассматриваемой проблемы; разработки способа оценки, который должен базироваться на использовании возможностей современных средств вычислительной техники.

При реализации указанной методики формируется линейная свертка частных критериев оценки качества функционирования объекта исследования:

$$K = \sum_{j=1}^{m} \alpha_j x_j, \qquad (1)$$

где x_j - значение j-го локального показателя, m — их общее число, α_j - параметры, значения которых определяются на основе решения последовательности задач линейного программирования (ЛП) с помощью следующего подхода.

Пусть в распоряжении исследователя имеется информация об n объектах (экономических, технических, социальных и т.д.), эффективность каждого из которых оценивается m локальными (частными) критериями, то есть известна матрица X:

$$X = \|x_{ij}\|, \ \mathrm{i} = \overline{1,n}, \ \mathrm{j} = \overline{1,m}, \qquad (2)$$

где x_{ij} - значение j-го критерия на i-ом объекте.

Поскольку вся объективная информация заключена в матрице X, для поиска вектора $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m)$ необходимо привлечение экспертов, специалистов в рассматриваемой предметной области.

Каждому из **P** экспертов предлагается указать два набора индексных множеств A и C, сформированных по правилам:

$$A^i = \left\{ \left(a_1^i, b_1^i\right), \left(a_2^i, b_2^i\right), \ldots, \left(a_{f_i}^i, b_{f_i}^i\right) \right\},$$

$$C^i = \left\{ \left(c_1^i, d_1^i\right), \left(c_2^i, d_2^i\right), \ldots, \left(c_{t_i}^i, d_{t_i}^i\right) \right\}, \qquad (3)$$

$$i = \overline{1,P}, \ S = 1,2,\ldots,P.$$

Смысл каждого из сформированных индексных множеств таков. Если $\left(a_l^i, b_l^i\right) \in A^i$, то i-ый эксперт считает, что объект с номером $a_l^i \in \{1,2,\ldots,n\}$ в целом функционирует лучше, чем объект с номером b_l^i, по всей совокупности критериев. Это, в соответствии с (3) означает, что должно выполняться неравенство:

$$K\left(a_l^i\right) \geq K\left(b_l^i\right). \qquad (4)$$

Если же $\left(c_l^i, d_l^i\right) \in C^i$, это будет означать, что с позиций i-го эксперта объекты с номерами c_l^i и d_l^i функционируют с одинаковой эффективностью, т.е.:

$$K\left(c_l^i\right) = K\left(d_l^i\right). \qquad (5)$$

Далее неизвестные параметры α_j, $j = \overline{1,m}$ определяются из решения задач ЛП [1], в которых либо минимизируется общая возможная противоречивость экспертных высказываний, возникающая из-за требований (4) и (5), либо максимизируется их общая разрешающая способность. Например, если объект с номером a_l^i лучше объекта с номером b_l^i, значит, он должен быть как можно лучше.

При анализе обработки экспертных оценок возникает проблема определения степени согласованности суждений экспертов. Она

связана с тем, что эксперт, сравнивая альтернативы попарно, не обязан вообще говоря задумываться об их соотнесении со всеми остальными. Для выявления возникающих возможных противоречий в результатах экспертизы предлагается следующая процедура, которая может использоваться наряду с алгоритмом из [1], с целью снижения мощности множеств A и C за счет исключения нетранзитивных высказываний.

На основе указанных экспертами пар в множествах A и C строится вспомогательная матрица **Y** размерностью $n \times n$, по которой осуществляется предварительная оценка результатов экспертизы.

Компоненты y_{gh} матрицы **Y** устанавливают соотношения между объектами и могут быть определены следующим образом:

$$y_{gh} = \begin{cases} +1, & \textit{если } g \textit{ предп.} h, \\ -1, & \textit{если } h \textit{ предп.} g, \\ 0, & \textit{если } g \textit{ и } h \textit{ равноценны.} \end{cases} \qquad (6)$$

Очевидна асимметричность матрицы **Y**. Поэтому достаточно рассмотрения только ее наддиагональной части.

Далее в соответствии с необходимостью соблюдения условия транзитивности рассчитываются новые отношения между объектами исследования по следующей обобщенной схеме. Если два соседних элемента матрицы **Y**, расположенных на g-той строке, один из которых с индексом столбца h_1, а другой — h_2 имеют одно из значений множества {-1, 0, 1}, то элементу, расположенному на строке с индексом h_1 и столбце с индексом h_2 присваивается соответствующее значение из множества {-1, 0, 1}. В алгоритмическом виде данная схема представляется в виде следующих правил:

если $y_{gh_1} = 0$ и $y_{gh_2} = -1$, то $y_{h_1h_2} = -1$;
если $y_{gh_1} = 1$ и $y_{gh_2} = -1$, то $y_{h_1h_2} = -1$;
если $y_{gh_1} = 0$ и $y_{gh_2} = 1$, то $y_{h_1h_2} = 1$;
если $y_{gh_1} = -1$ и $y_{gh_2} = 1$, то $y_{h_1h_2} = 1$;
если $y_{gh_1} = 1$ и $y_{gh_2} = 0$, то $y_{h_1h_2} = -1$; (7)
если $y_{gh_1} = -1$ и $y_{gh_2} = 0$, то $y_{h_1h_2} = 1$;
если $y_{gh_1} = 0$ и $y_{gh_2} = 0$, то $y_{h_1h_2} = 0$;
если $y_{gh_1} = -1$ и $y_{gh_2} = -1$, то $y_{h_1h_2} = 0$;
если $y_{gh_1} = 1$ и $y_{gh_2} = 1$, то $y_{h_1h_2} = 0$;
где: $g = \overline{1,n}$, $h_1 = \overline{1,n}$, $h_2 = \overline{1,n}$.

В случае, если добавляемое отношение уже имеет значение, полученное на предыдущем этапе построения вспомогательной матрицы в соответствии с правилом (6), производится генерация сообщения о нарушении условия транзитивности суждений.

Найденные в результате реализации алгоритма пары объектов исследования, нарушающие условие транзитивности, исключаются либо автоматически, либо на основе интерактивного диалога с экспертом. Во втором случае будет выводиться сообщение о противоречии с указанием пар отношений, в которых произошло нарушение транзитивности.

После проверки возможных противоречий в экспертных оценках решается задача выявления уровня компетентности каждого из **P** экспертов на основе сформированной матрицы (2), коэффициентов свертки (1) и множеств A^i и C^i, $j = \overline{1,P}$.

Ее решение состоит в следующем: чем оцениваемый уровень компетентности j-го эксперта выше, тем менее противоречивыми должны быть его высказывания и тем большей разрешающей способностью они должны обладать.

Рассмотрим числа u_l^i и v_l^i, введенные по следующим правилам:

$$u_l^i = \begin{cases} K\left(a_l^i\right) - K\left(b_l^i\right), & \textit{при } \left(a_l^i, b_l^i\right) \in A^i, \\ 0, & \textit{в противном сл.}, \end{cases} \qquad (9)$$

$l = \overline{1, f_i}$, $i \in S$, где $S^i = 1,2,\ldots,P$,

$$v_l^i = \begin{cases} K\left(c_l^i\right) - K\left(d_l^i\right), & \textit{при } \left(c_l^i, d_l^i\right) \in C^i, \\ 0, & \textit{в противном сл.}, \end{cases} \qquad (10)$$

$l = \overline{1, t_i}$, $i \in S$.

Для учета противоречий в экспертных высказываниях и их разрешающей способности, а также принимая во внимание, что эксперты в общем случае могут генерировать разное количество высказываний, введем числа:

$$\gamma^i = \frac{\sum_{l=1}^{f_i} u_l^i + \sum_{l=1}^{t_i} v_l^i}{\left|A^i\right| + \left|C^i\right|}, \; i = \overline{1,P}, \qquad (11)$$

где символом $\left|A^i\right|$ - обозначена мощность (число элементов) множества A^i.

Легко видеть, что при $\gamma^i > 0$ высказывания i-го эксперта в основном непротиворечивы, при $\gamma^i < 0$ — нет.

Следующая операция приводит все γ^i к положительному виду:

$$\omega^i = 1 + \gamma^i + \max_{\gamma^i < 0} \left| \gamma^i \right| . \qquad (12)$$

В завершении необходимо промасштабировать числа ω^i:

$$\varphi^i = \frac{\omega^i}{\sum_{k \in S} \omega^k} \in (0,1) . \qquad (13)$$

Величины φ^i, $i \in S$ и будут искомыми оценками уровня компетентности каждого эксперта. Их можно использовать также и в качестве «весов» высказываний экспертов для корректировки значений α_i в соответствии с описанным в [1] алгоритмом.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Носков С.И., Удилов В. П. Управление системой обеспечения пожарной безопасности на региональном уровне. — Иркутск: ИрГУПС, ВСИ МВД России. 2003. — 151 с.

Печенкина В.В., Арбатская Н.А.

УДК 658.011.56

ОЦЕНКА ЭКОНОМИКО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА

Создание корпоративной системы управления качеством (СМК) ОАО «РЖД», определяет использование основных показателей работы железных дорог. Для правильного планирования и выявления закономерностей использования статистических данных в связи с множеством дорог целесообразно рассмотреть вопрос об однотипности поведения основных производственно-экономических показателей работы различных дорог, и, если возможно, классифицировать дороги в группы по схожести (или не существенности расхождения) изменения того или иного основного показателя.

Данный вопрос может быть рассмотрен на основе однофакторного дисперсионного анализа, где в качестве фактора выступает наименование дороги. В качестве основных показателей были рассмотрены доходы от перевозок (млн. руб.), себестоимость перевозок (коп. за 10 привед. ткм.), производительность труда работников, занятых на перевозках (тыс. привед. ткм.) и др.

Рассматривая показатель "доходы", по однотипности поведения данного показателя, железные дороги можно разбить на четыре группы:

I группа — Октябрьская и Московская дороги;

II группа — Свердловская, З-Сибирская и Д-Восточная дороги;

III группа — Горьковская, Северная, С-Кавказская, Куйбышевская, Ю-Уральская, В-Сибирская, Забайкальская;

IV группа — Ю-Восточная;

V группа - Приволжская, Красноярская.

В табл. 1 представлены результаты расчетов в системе Excel для третьей группы дорог. Влияние исследуемого фактора (наименование дороги) определяется по величине значимости критерия Фишера, которая находится в таблице *Дисперсионный анализ* на пересечении строки *Между группами* и столбца *P-Значение.* В случаях, когда *P-Значение ≥0,05,* критерий Фишера не значим и исследуемый фактор не влияет на изменения показателя. Другими словами, можно заключить, что для данной

Табл. 1.

Однофакторный дисперсионный анализ.

Однофакторный дисперсионный анализ

ИТОГИ

Группы	*Счет*	*Сумма*	*Среднее*	*Дисперсия*
Горьк	57	86578,6	1518,9228	555196,3
Сев	57	96463,3	1692,3386	502869,3
С-Кавк	57	84292,6	1478,8175	324316,3
Куйбш	57	84838	1488,386	413634,13
Ю-Урал	57	83107,8	1458,0316	651926,65
В-Сиб	57	93778,9	1645,2439	691551,19
Заб	57	85183,4	1494,4456	596544,52

Дисперсионный анализ

Источник вариации	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-Значение*	*F критическое*
Между группами	2845828,4	6	474304,73	0,8886775	0,5030934	2,121716136
Внутри групп	209218150	392	533719,77			
Итого	212063978	398				

группы дорог показатель — доходы ведет себя однотипно.

Об однотипности можно судить и по графикам изменения показателя (Рис. 1), а о различии между группами можно судить по уравнениям линейных трендов и изменении их угловых коэффициентов.

Так, для Московской и Октябрьской жел. дорог уравнения линейных трендов соответственно имеют вид

$$y = 74{,}2x + 862{,}1\,,\quad y = 59{,}7x + 1116{,}7\,.$$

Следует отметить, что группы отличаются угловыми коэффициентами роста трендов. Угловые коэффициенты для второй группы изменяются от 43,6 до 47,6 , для третьей группы — от 33,1 до 42,2 ,а для пятой группы — от 20,6 до 24,9.

Для "себестоимости" железные дороги по однотипности поведения показателя можно распределить на пять групп:

I группа — Ю-Урал., Горьк., Заб., З-Сиб;

II группа — Ю-Вост., Сев., Куйб., Красн., В-Сиб.;

III группа — Свердл.;

IV группа — Прив., Д-Вост.;

V группа —. Окт., Моск., С-Кавк.

Угловые коэффициенты роста линейных трендов себестоимости изменяются:

для первой группы - от 2,15 до 2,3; для второй группы - от 3,04 до 3,2; для третьей - 3,6; для четвертой группы - от 4,2 до 4,6; для пятой - от 5,4 до 5,8. Диаграмма средних значений себестоимости по группам представлена на рис. 2.

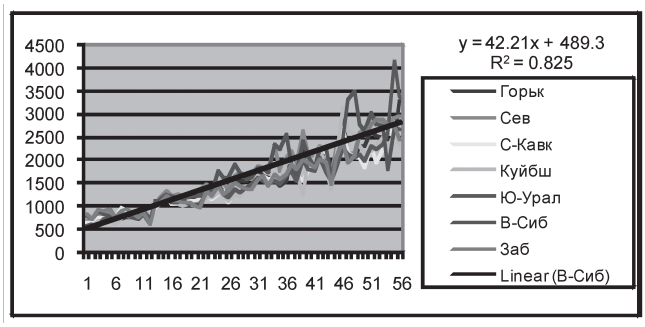


Рис. 1. Изменения показателя *доходы* **для третьей группы дорог и линейный тренд В-Сиб. дороги.**

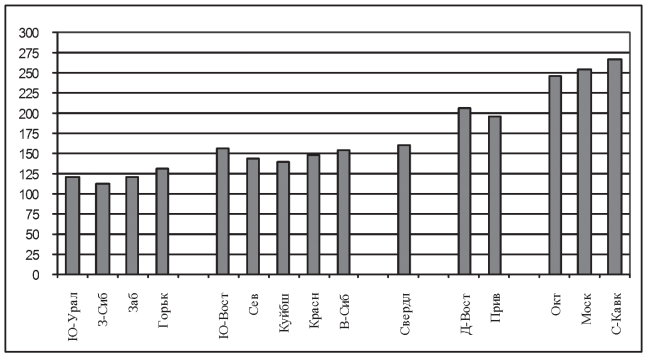


Рис. 2. Диаграмма средних значений себестоимости дорог.

Табл. 2.

Рраспределение железных дорог по ппоказателю "производительность".

Группа	Жел. дорога	Ср. значения показателя	Уравнение тренда
I	Заб., З-Сиб.	201,9; 193,4.	Y=1,03x+165,7 Y=1,46x+142,35
II	В-Сиб., Сев.	176,3; 170,8.	Y=0,7x+146,22 Y=0,65x+153,52
III	Ю-Урал., Свердл., Горьк., Красн., Куйбыш.	164,2; 158,7; 157,5; 157,4; 148,9.	Y=1,08x+126,26 ---------- Y=0,68x+125,2
IV	Д-Вост.	135,4	Y=0,8x+107,56
V	Ю-Вост.	125,4	Y=0,87x+94,8
VI	Окт., Моск., Привол.	120,6; 114,0; 112,6	Y=0,46x+104,32 ---------- Y=0,45x+96,6
VII	С-Кавк.	86,8	Y=0,51x+68,9

По показателю "производительность" железные дороги в соответствии с дисперсионным анализом и анализом статистических данных распределились по следующим группам (табл. 2).

Более того после классификации по группам для тех или иных показателей железных дорог можно судить об эффективности работы железных дорог.

В качестве обобщенного критерия оценки эффективности может быть принята функция, равная взвешенной сумме частных критериев

$$K_Э = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i K_i ,$$

где λ_i - весовые коэффициенты критериев оптимальности (при этом может быть принято условие $\sum_{i=1}^{n} |\lambda_i| = 1$); K_i - частные критерии (в качестве которых могут быть приняты показатели: доходы, себестоимость, производительность и др.).

Например, рассматривая только три частных критерия (доходы, себестоимость, производительность) и беря в качестве значения критерия номер группы, в которую входит та или иная дорога по данному показателю (критерию), и допуская, что все весовые коэффициенты единичные, получим следующие результаты.

Западно-Сибирская дорога по доходам входит во вторую группу, по себестоимости - в первую, по производительности тоже в первую. В сумме получаем четыре балла в качестве оценки эффективности работы железной дороги по данным показателям. Для Забайкальской дороги получаем 5 баллов, для Красноярской — 10, а для Московской и Октябрьской — 11 и т. д.

В заключении следует отметить целесообразность применения однофакторного дисперсионного анализа для исследования показателей работы железных дорог.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Супрун В.Н., Лакин И.К. Системный анализ показателей работы железных дорог как исходных данных систем менеджмента качества — Красноярск: Изд-во "Гротеск", 2005, - 52 с.
2. Информационный справочник по основным показателям работы железных дорог (1998/1999г.г.). ЦНИИТЭИ МПС — М.:2000. - 128 с.
3. Информационный справочник по основным показателям работы железных дорог (1999/2000г.г.). ЦНИИТЭИ МПС — М.:2001. - 152 с.
4. Информационный справочник по основным показателям работы железных дорог (2000/2001г.г.). ЦНИИТЭИ МПС — М.:2002. - 146 с.
5. Информационный справочник по основным показателям работы железных дорог (2001/2002г.г.). ЦНИИТЭИ МПС — М.:2003. - 181 с.
6. Информационный справочник по основным показателям работы железных дорог (2002/2003г.г.). ЦНИИТЭИ МПС — М.:2004. - 188 с.

Дмитренко А.В.

УДК 656.222.4

ПРИНЦИПЫ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ СТРАН МИРА НА ПЕРСПЕКТИВУ

Во все времена существования человеческого общества как отдельные лица, так и целые государства стремились достичь более высокого жизненного уровня. В то же время, ввиду неодинаковых природных условий, наличия климатических особенностей, большая часть стран мира оказалась на различном уровне своего развития. В категорию стран с самым высоким техническим и экономическим уровнем развития попали, так называемые страны золотого миллиарда. В публичной печати высказывается мнение, что данные передовые страны, используя свое привилегированное положение, будут продолжать и далее эксплуатировать отсталые страны мира и за счет этого значительно обогащаться [4, 5].

В послевоенные годы, в результате освободительных войн, направленных на ликвидацию колониальной зависимости, в мире образовалось много новых стран, стремящихся достичь высоких экономических показателей и улучшить жизненный уровень своего населения.

При этом, в целях поднятия уровня благосостояния населения руководителям ранее отсталых стран мира стали рекомендовать к использованию порядок деятельности и структуру управления, как отдельными предприятиями, так и в целом государствами, достигшими высокого технического оснащения среди всех стран мира. В частности, для повышения уровня экономического развития, обеспечения высоких темпов роста материального благосостояния отсталым странам рекомендуют широко внедрять в свою практику методы и приемы работы, способы управления жизнью общества, которые применяются на современном этапе в передовых капиталистических странах. При этом рекомендуется в производственной деятельности немедленно внедрять передовую технологию на предприятиях. В этом случае, для быстрого приобретения дорогостоящей техники предприятиям и целым странам рекомендуется сразу брать кредиты большой величины на длительный срок [1, 2]. Однако данный вариант опасен тем, что может вызвать значительные потери, связанные с оплатой по процентам за взятые в долг средства.

Кроме того, стало высказываться мнение, что основным двигателем развития экономики общества на современном этапе истории является КОНКУРЕНЦИЯ [2, 3].

В научной литературе считается, что наиболее высокий уровень благосостояния всего населения каждой отдельной страны может быть достигнут только за счет применения в производственной деятельности и в быту сложнейшей дорогостоящей техники [2].

Однако, для оценки возможных перспективных путей роста экономики для ранее отсталых стран мира необходимо учитывать, имеющие место значительные отличия в характере затрат в данных странах для различных этапов развития истории.

Передовые в техническом и экономическом отношении страны мира в своем развитии в течение нескольких веков достигли высокого эффекта за счет нижеприведенных факторов, а именно: на начальном этапе развития истории все человечество в течение многих столетий находилось на нищенском уровне. Технические средства, обеспечивающие рост жизненного уровня, в тот период отсутствовали во всем мире. Ни конкуренция, ни огромные затраты труда в тот начальный период развития истории не обеспечивали роста жизненного уровня населения. Несмотря на принимаемые усилия в общественной и производственной деятельности, объем производства стран мира и жизненный уровень населения почти не возрастали. И лишь с началом применения в практической деятельности первых достижений науки и техники, широкомасштабного использования внешних источников энергии: в первую очередь УГЛЯ и особенно НЕФТИ, объем производства стран мира стал заметно возрастать, несмотря на наличие в 20-м веке двух разрушительных войн.

В связи с особенностями развития общества в зависимости от местных климатических условий в наиболее удачном положении оказались европейские страны, имеющие на начальном этапе технического прогресса благоприятные для развития экономики условия: наличие полезных ископаемых, и в первую очередь обширные месторождения угля и железа, а также климат, благоприятный для жизни.

Полученные в результате использования в практической деятельности достижения научно-технического прогресса затем использовались поэтапно, изменяясь с развитием истории. К таким этапам можно отнести следующие.

1). Появление материального богатства было связано с использованием в практической деятельности достижений науки и техники, с внедрением и использованием в практике внешних источников энергии, при одновременном повышении квалификации сотрудников.

2). На начальном этапе развития истории преобладающая часть вновь созданных материальных ценностей направлялась на создание устройств инфраструктуры [1]. Появляющиеся средства направлялись на строительство новых дорог, жилищ, городских коммуникаций. В дальнейшем эти огромные материальные ценности позволяли обеспечивать функционирование производственных процессов и средств транспорта с меньшими затратами. Обширное строительство домов в последующие годы позволяло обеспечивать нормальную жизнь для населения, особенно в суровых климатических условиях. В сфере транспорта осуществлялось сооружение автострад и новых железнодорожных линий, строительство станций и депо, мостов и тоннелей.

3). На следующем этапе после создания устройств инфраструктуры стали осуществляться значительные затраты в функционирование производственных процессов на новой технологической основе. Так, к примеру, в целях увеличения объемов перевозок на железнодорожном транспорте осуществляется простое увеличение количества вагонов и локомотивов, в целях освоения возрастающих объемов перевозок. В домашних условиях после приобретения квартир осуществляется приобретение мебели, технических средств, обеспечивающих повышение производительности труда, улучшение жизненного уровня населения.

4). После достижения определенного уровня жизни, накопления значительного богатства на следующем этапе у людей появляется возможность больше отдыхать, получать дополнительные наслаждения от высокого уровня жизни. Следует отметить, что для развивающихся стран характер экономических затрат для данного этапа развития будет изменяться, по сравнению с начальными условиями функционирования хозяйственной деятельности стран мира.

Так, на начальном этапе развития технического прогресса материальные ценности, направляемые в инфраструктуру, и в технические средства, обеспечивают последующий быстрый экономический рост страны, улучшение всех количественных и качественных показателей работы предприятий. Строительство новых дорог позволяет, в дальнейшем, обеспечивать с меньшими затратами передвижение грузов и пассажиров. При этом в случае строительства спрямляющих линий достигается значительное сокращение пробега грузов и пассажиров, по сравнению с ранее существовавшими транспортными связями.

После значительного насыщения объектами инфраструктуры территории страны следует быстрый рост объема материальных ценностей прежде всего за счет увеличения количества технических средств промышленности и сельского хозяйства. Это и обеспечение населения страны собственными средствами транспорта, мебелью и техникой. Их использование в производственной деятельности и в домашней обстановке позволяет получать значительный эффект.

В современных условиях для дальнейшего повышения своего жизненного уровня, получения личных удовольствий, стало модным осуществление туристических поездок, чаще всего в другие страны. В данном случае, при наличии избытка денежных средств, путешествуя, люди имеют возможность для получения дополнительных наслаждений в личной жизни, которые не представляется возможности получать в повседневной жизни.

Кроме того, туризм позволяет показать другим людям, что данные лица являются более состоятельными и достигли успеха в своей жизни.

В то же время, туризм, как таковой, обладает определенной особенностью осуществления затрат, а в дальнейшем и в получении эффекта, значительно отличающегося от характера производственных процессов, происходящих в промышленности и в сельском хозяйстве. Так, туризм связан с огромными транспортными расходами, особенно в случае посещения других стран мира. При этом материальные ценности из своей страны перетекают в те страны мира, которые туристы посещают в период проведения своих развлекательных поездок. Поэтому в случае организации туризма между странами, экономическое развитие отдельных государств изменяется по совершенно иным закономерностям, в отличие от тех, которые имеют место в обычных условиях функционирования предприятий.

Расходы и эффект в данном случае зависят от того, из какой страны и в какую осуществляется туризм. Так, в производственной деятельности, происходит накопление материальных ценностей, осуществляется создание новых объектов. В то же время, в туризме происходит расходование ранее накопленных материальных ценностей. Поэтому в данном случае, основные расходы несут страны, направляющие своих людей за границу. В выигрыше оказываются те страны, которые посещают туристы.

В данном случае страна, принимающая туристов, получает двойной эффект, а именно.

1. Страна получает доход от поступления в значительных размерах валюты.

2. В более быстрые сроки уменьшается разница в экономическом уровне между самыми богатыми и наиболее отсталыми странами, куда осуществляется поездка туристов.

Исходя из этого, страна, в которую направляется наибольшее количество туристов, получает дополнительные стимулы в своем развитии, и в достижении её превосходства в экономическом соревновании с другими странами мира.

Положение с величиной туристических поездок в различные страны мира значительно изменялось с развитием истории. Массовые туристические поездки оказываются возможными только при значительном развитии средств транспорта и в случае наличия мирных отношений между государствами. Поэтому усиленное развитие туризма началось только после завершения Наполеоновских войн, и длительного последующего сравнительно мирного периода взаимоотношений между странами во всем мире.

С этого момента первые туристы направлялись преимущественно в передовые страны Западной Европы. Здесь люди могли учиться совершенствованию передовых технологий, познавать новые достижения науки и техники. Поэтому в начальный период развития путешествий передовые страны обогащались за счет туризма в большей степени, по сравнению с ранее отсталыми странами мира.

Положение с характером развития туризма существенно изменилось на современном этапе научно-технического прогресса, когда с началом массового использования газет, радио и телевидения люди получили возможность для приобретения всех необходимых знаний практически в домашних условиях. На современном этапе люди используют туризм для организации своего отдыха, получения различных развлечений.

Теперь люди стали чаще искать отдыха в местности с более благоприятным климатом и поэтому стали посещать отсталые страны.

В изменившихся условиях поведения людей возникла проблема оценки возможных путей развития экономики стран мира, в том числе и за счет эффективности сферы туризма.

В последние годы, особенно в связи с проведением во многих странах мира экономических реформ, стали считать, что только новейшие технические средства, инвестиции способны оказывать влияние на характер развития экономики страны мира и поднимать ее на новый и более высокий экономический уровень. В то же время, каждый способ осуществления затрат денежных средств или материальных ценностей имеет определенные особенности для государств, находящихся на различных ступенях развития человеческой истории, с различным уровнем накопления богатства для стран мира.

На начальном этапе развития истории основные затраты в развитие науки и техники, в рост экономического могущества стран мира осуществляли, в основном, наиболее передовые страны Европы. Развитие науки и техники в этих странах позволило создавать новые технические средства, обеспечивающие, в случае их применения, значи-

тельное повышение производительности труда. Система науки и техники, самых передовых в техническом и экономическом отношении стран мира, создала значительный задел, благодаря которому в современных условиях имеется возможность для достижения дальнейших высоких экономических результатов за счет последующего их использования в практической жизни.

Поэтому развивающиеся страны, в настоящее время, имеют совершенно иные условия для своего экономического роста, по сравнению с передовыми и самыми богатыми странами мира, а также с теми условиями, которые имели самые богатые страны мира несколько веков назад.

В современных условиях для отсталых стран мира уже созданы научные и производственные заделы самыми богатыми и технически развитыми странами. Поэтому, приобретая сейчас передовые технологии люди отсталых стран мира могут легко и с успехом пользоваться плодами цивилизации 21 века.

Отсталым странам, не имеющим высших учебных заведений, и собственных творческих достижений, абсурдно направлять свои усилия на создание основ науки и техники, на технический прогресс. Они с успехом могут пользоваться такими благами цивилизации, закупая готовые технологии из-вне.

В создавшихся обстоятельствах необходимо находить пути своего преимущественного развития, для которых отсталые страны мира будут иметь большую привлекательность в действиях, по сравнению с передовыми странами мира.

Следовательно, в современных условиях необходимо выбрать оптимальный путь развития отсталых стран при наличии в мире огромных достижений науки и техники, уже реализованных передовыми странами. Так, передовые страны сейчас имеют в избыточном количестве созданные объекты инфраструктуры: в виде дорог, производственных строений, комфортабельных жилищ большой площади. В мире выпущены в огромных количествах высокопроизводительные машины, различное оборудование, новейшие средства связи. Учитывая все это, отсталые страны в 21 веке могут с меньшими затратами достигать высокого уровня своего развития, используя научный и технический потенциал, созданный передовыми странами на протяжении нескольких предыдущих веков. Поэтому, в настоящее время отсталым странам сравнительно легче достигать высоких экономических показателей.

К числу факторов, по которым на современном этапе технического прогресса отсталые страны могут превосходить по способам достижения успехов передовые страны мира можно отнести следующие: в ряде научных источников утверждается, что только конкурентоспособная продукция может дать эффект в осуществлении выхода экономики страны на более высокий уровень [2, 3]. При этом под конкурентоспособностью преимущественно подразумевается продукция, которая создается за счет использования передовой высокопроизводительной техники.

В то же время, следует учесть, что любой и даже ручной труд, создающий материальные ценности посредством применения ранее существовавшей несколько веков назад и считающейся в настоящее время отсталой технологией, дает значительный эффект. Так, например, ручной труд на дачах, позволяет в огромных количествах выращивать продукцию и сразу её потреблять без дополнительной транспортировки на большие расстояния, превышающие много тысяч км. При этом отпадает необходимость в приобретении данной продукции за границей за валюту.

На основании вышеизложенного, в создавшихся обстоятельствах, каждая отсталая страна должна найти такую область деятельности, которая будет конкурентоспособна и более эффективна, по сравнению с передовыми и наиболее богатыми странами мира. Такая область деятельности в отсталых странах мира позволяет за счет её реализации на рынке, получать твердую валюту. Это, в свою очередь, дает возможность приобретать и в дальнейшем использовать в своей деятельности самую высокопроизводительную технику.

В то же время, следует учесть, что достижения возможны не только за счет более совершенной технологии. Для отсталых стран высокие достижения возможны в результате искусственного занижения создания более низкой себестоимости выпускаемой продукции, достигаемой на начальном этапе за счет низкой оплаты своего труда, по сравнению с такими же затратами труда работников в передовых и наиболее богатых стран мира. Кроме того, в настоящее время, отста-

лым в своем развитии странам мира в реализации товаров невозможно конкурировать с другими более развитыми государствами в области науки и техники. Ведь для этого, кроме передовой технологии производства необходимы специалисты высокой квалификации, которые способны обеспечивать функционирование техники и технологий на уровне самых передовых стран мира. Естественно, что в данной сфере жители отсталых стран мира не могут конкурировать.

Получение кредитов большой величины и создание сложных технических производств на начальном этапе тоже становится менее возможным. Вызвано это тем, что за огромные кредиты придется платить значительные средства по процентам, что вначале оказывается не под силу странам, относящимся к данной категории развития.

В то же время, отсталые страны обладают рядом достоинств. Так, в большей части развивающихся стран мира климат может быть более благоприятным для отдыха и развлечений, по сравнению с передовыми странами. Обслуживающий персонал здесь, оказывается более молод, по сравнению с возрастом коллег в передовых стран мира.

Практика последних десятилетий показала, что на современном этапе развития технического прогресса отсталые страны имеют преимущество, по сравнению с передовыми странами мира в следующих областях:

- в области возможного наличия перспективных и дефицитных полезных ископаемых. Так, например, арабские страны, имея богатые месторождения нефти, смогли в быстрые сроки достигнуть высокого уровня своего благосостояния без затрат труда и отсутствия высоких достижений в технологии производства;

- на особом положении в мировой практике на современном этапе находится туризм. В настоящее время люди предпочитают отдыхать в странах, расположенных вдали от шумных мегаполисов. Многие отсталые страны для отдыха имеют лучшие условия: более благоприятный климат, морские пляжи, по сравнению с передовыми странами мира. Поэтому в последние десятилетия многие состоятельные лица стали для отдыха и туризма предпочитать страны Юго-Восточной Азии, по сравнению с ранее имеющими популярность странами Западной Европы.

Туризм характеризуется рядом особенностей:

- здесь и климатические условия, которые могут быть более благоприятными для отдыха;

- здесь и получение наслаждений за счет оказания интимных услуг состоятельным лицам. Такие услуги вдали от посторонних глаз могут оказаться весьма популярными, и привлечь в данную страну значительный поток состоятельных туристов, жаждущих романтики и экзотики.

Поэтому путь экономического развития отсталых стран мира, особенно стремящихся достичь высоких экономических показателей, необходимо будет осуществлять в обратной последовательности, по сравнению с характером экономического развития и получением экономических достижений в передовых странах мира (см. рис.1).

В отсталых странах при отсутствии месторождений ценных полезных ископаемых, не-

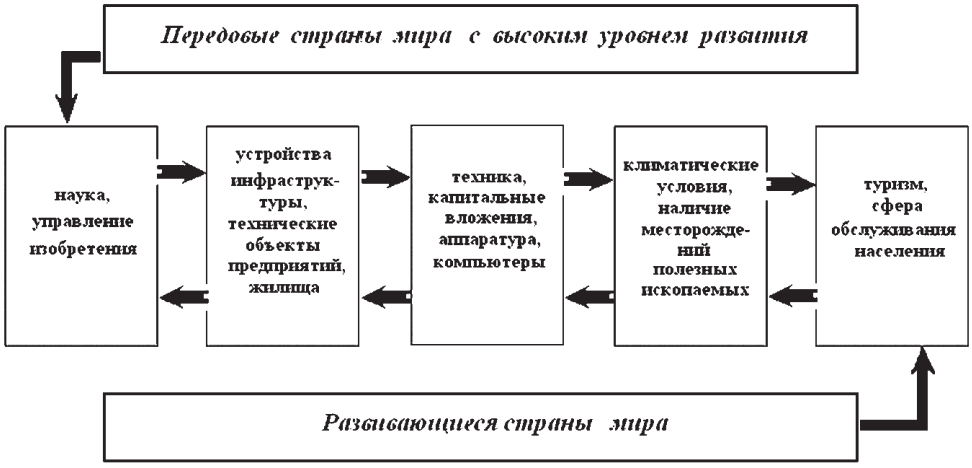


Рис. 1. Схема последовательного развития передовых и развивающихся стран мира.

обходимо начинать экономический рост страны с развития туризма. Использование климатических условий и доступность людских ресурсов позволяет привлечь туристов с большими материальными возможностями, что в свою очередь позволяет получать значительный объем валюты, который будет в последующем использован для приобретения технических средств.

На заключительном этапе необходимо приобретение высокопроизводительных экономических средств, а также устройств или объектов инфраструктуры. Данные меры приведут к тому, что появятся возможности в дальнейшем приобретении высокопроизводительной техники, а также создании средств инфраструктуры.

В корне противоположный рациональный путь развития отсталых стран мира приводит к тому, что в их практической деятельности нельзя пользоваться многовековым опытом технически развитых стран. Следовательно, таким государствам необходимо иметь особый путь развития, который отличается от передовых стран мира.

Этот анализ также показывает, что если страна не будет развивать туризм, то она будет в быстрые сроки попадать в экономическую зависимость от передовых стран мира.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Дмитренко А. В. Как выводить отсталые страны к изобилию. —Иркутск: ИГТУ. 1999. — 236 с.
2. Квартальнов В. А. Туризм. М. — Финансы и статистика. 2003. 320 с.
3. Кэмпбелл Р. Макконнелл, Сиэнли Л. БРЮ. Экономикс.-М.: «Республика», 1993. т. 1.-400 с.
4. Паршев А. П. Почему Россия не Америка. М. Форум. 2000. — 410 с.
5. Стюарт Томас. Богатство от ума. - Минск Парадокс. 1998. — 352 с. — Сер. «Поле чудес: бизнес».

Карнаухова В.К., Краковская Т.А.

УДК. 331.108.4:519

ВЫБОР НОВЫХ СПЕЦИАЛИЗАЦИЙ ДЛЯ СФЕРЫ УСЛУГ

Сервис в общепринятом определении - область деятельности человека, направленная на оказание услуг, обеспечивающих функционирование производственной и социальной сфер, домашнего хозяйства, семьи и личности. Социально-культурный сервис и туризм — область сервиса, которая включает совокупность средств, способов и методов удовлетворения социокультурных, информационных, оздоровительных и иных потребностей. Объектами профессиональной деятельности специалиста являются услуги, оказываемые в области туризма, современных типов связи, музейно-выставочного дела, документоведения и делопроизводства, гостиничного хозяйства и связанных с ними информационных технологий.

Выше перечисленное обосновывает необходимость открытия новых специализаций в сфере услуг. В качестве средства решения задачи авторами выбрана экспертно-статистическая процедура, использующая метод анализа иерархий [1, 2].

Задачу выбора, представим в виде трёхуровневой модели. На верхнем уровне формулируется цель (S), на среднем уровне необходимо определиться с критериями ($R_i, i=\overline{1,n}$), раскрывающими цель, а на нижнем - со средствами достижения цели ($P_j, j=\overline{1,m}$). В нашем случае этими средствами являются специализации для сферы услуг.

Важной компонентой МАИ является матрица суждений

$$A=\left(a_{ij}\right),\ i,j=\overline{1,h}.$$

Для матрицы суждений A требуется найти максимальное собственное значение λ_{max} и вектор собственных значений Z, т.е. необходимо решить уравнение

$$AZ = \lambda Z. \qquad (1)$$

Согласованность матрицы суждений A проверяется через индекс согласованности

$$IS = \left(\lambda_{\max} - h\right) / \left(h - 1\right), \qquad (2)$$

и отношение согласованности

$$OS = IS / SI(h). \qquad (3)$$

Число матриц суждений по каждому эксперту равно $(n+1)$, где n — количество критериев.

Технология решения задачи по каждому эксперту следующая.

1. Вводится матрица суждений для критериев размерности $(n \times n)$.

2. Для этой матрицы определяется максимальное собственное значение и собственный вектор Z, соответствующий этому значению — решение уравнения (1). Дополнительно определяются индекс согласованности (2) и отношение согласованности (3).

3. Относительно каждого критерия вводятся последовательно n матриц суждений по специализациям размерности $(m \times m)$, где m — число специализаций. Для каждой из них выполняется пункт 2. Их вектора собственных значений образуют матрицу $Q = \left(q_{ij}\right)$, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$.

4. Искомый вектор весовых коэффициентов для специализаций

$$Y = QZ, \quad Y = \left(y_1, y_2, \ldots, y_m\right)'. \qquad (4)$$

Предпочтительнее специализация с большим коэффициентом (вектор весовых коэффициентов нормализован, $\sum_{i=1}^{m} y_i = 1$).

Приведем перечень специализаций оцениваемых экспертами:

1. Сервис связи;
2. Гостинично-ресторанный сервис;
3. Туризм;
4. Стандартизация и сертификация услуг;
5. Офис-менеджмент;
6. Документоведение.

По методу анализа иерархий ранжирование объектов осуществляется по множеству критериев. Для нашей задачи мы отобрали и согласовали с экспертами пять критериев, приведенных ниже:

A. возможность продвижения по служебной лестнице;

B. зарплата, работающих по данной специальности;

C. спрос на специальность с точки зрения трудоустройства, включая возможность трудоустройства за границей;

D. возможность открытия собственного дела;

E. возможность быть полезным для региона.

Список экспертов по их просьбе не раскрывается: Э1, Э2, Э3, Э4, Э5, Э6. Ниже (табл. 1) приведена матрица суждений по одному из экспертов.

В табл. 2 приведены результаты ранжирования в виде рангов (1 — наиболее востребованная специализация, 6 — наименее востребованная) по каждому эксперту и по "среднему" эксперту (Σ); Э - эксперты; В — вариант специализации. Однородность экспертов была проверена по S-критерию

$$S_p = K(m-1)W;$$
$$W = \frac{12U_p}{K^2(m^3 - m)}; \qquad (5)$$
$$U_p = \sum_{i=1}^{m}\left(\sum_{k=1}^{K} r_{ik} - \frac{1}{2}K(m+1)\right)^2.$$

Здесь K — количество экспертов, m — число специализаций, r_{ik} — значение ранга для i-ой специализации по k-му эксперту, W — коэффициент конкордации.

Таким образом, три специализации, которые необходимо организовать в первую очередь и которые будут востребованы рынком

Табл. 1.

Матрица суждений по критериям.

Критерии	A	B	C	D	E
A	1	3	1/5	1/7	1/3
B	1/3	1	1/7	1/9	1/5
C	5	7	1	1/3	3
D	7	9	3	1	5
E	3	5	1/3	1/5	1

Отношение согласованности = 0,05

Табл. 2.

Результаты ранжирования.

В/Э	1	2	3	4	5	6	∑
1	2	3	3	6	5	2	4
2	6	1	2	2	3	6	3
3	1	2	1	1	4	5	1
4	3	4	4	4	1	1	2
5	4	5	6	5	6	4	6
6	5	6	5	3	2	3	5

труда с точки зрения экспертов, выглядят следующим образом.

1.Туризм.

2. Стандартизация и сертификация услуг.

3. Гостинично-ресторанный сервис.

Следует подчеркнуть, что данный подход применим при выборе новых специализаций или специальностей и для других сфер экономики.

Потребность (численность) в специалистах по конкретной специализации решается рыночным механизмом «спроса и предложений» с учетом социально-экономического развития региона.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
2. Краковский Ю.М., Карнаухова В.К. Методы анализа и обработки данных для мониторинга регионального рынка образовательных услуг. М.: Издательский центр «МарТ», 2007. 240 с.

УЧЕНЫЕ РОССИИ

ЛЕТНИКОВ Ф.А.

Родился 3 октября 1934 г. в г. Полоцке Белорусской ССР, в семье военнослужащих партийных работников, русский. Отец погиб в 1943 г.

С 1949 г. по 1953 г. обучался в горно-металлургическом техникуме в г. Щучинске Кокче-тавской области (Казахстан). После окончания техникума работал старшим коллектором, младшим геологом и начальником поискового отряда конторы "Средаззолоторазведка» (г. Ташкент).

В 1956 г. стал геологом тематической партии треста «Казцветметразведка» (Алма-Ата, Казахстан). С 1957 г. по 1965 г. был младшим, а затем старшим научным сотрудником в Казахском институте минерального сырья Министерства геологии Казахской ССР.

В 1961 г. закончил Всесоюзный заочный политехнический институт, кафедру полезных ископаемых геологического факультета, получил квалификацию «горный инженер-геолог». Вел самостоятельные научные исследования по диссертационной теме «Изобарные потенциалы образования минералов и применение их в геохимии», без научного руководителя. В 1964 г. успешно защитил эту работу с присвоением ученой степени кандидата геолого -минералогических наук. С 1965 г. бессменно возглавляет лабораторию экспериментальной минералогии и петрографии (в 1975 г. переименована в лабораторию экспериментальной и теоретической петрологии) в Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

В середине 60-х годов в области физико-химических исследований им было проведено сопоставление изобарных потенциалов образования минералов, что позволило обосновать понятие о самородности элементов, объяснить поведение рудных и рассеянных элементов в природе, смену режима кислорода и серы в гидротермальном процессе, зональное отложение минералов в Т-поле (Т - температура). Эти результаты вошли в учебники по геохимии. Впервые на основании термодинамических расчетов была оценена энергетика флюидных систем по разрезу литосферы

(от глубины 200 км и до поверхности) и показана значительно более высокая энергоем-кость восстановленных флюидов по сравнению с окисленными. Экспериментально открыт эффект длительного пребывания воды в метастабильном состоянии (активированная вода) после нагрева при высоких Т и Р (Р - давление). Опубликованы монографии: «Изобарные потенциалы образования минералов и применение их в геохимии» (1965, соавторы Жатнуев Н.С., Лашкевич В.В.); «Активированная вода» (1976, соавторы Кащее-ва Т.В., Минцис А.М.); «Взаимодействие гранитного расплава с карбонатами и силикатами» (1978, соавторы Медведев В.Я., Иванова Л.А.); «Флюидный режим термоградиентных систем» (1985, соавторы Жатнуев Н.С., Лашкевич В.В.); «Петрофизика и геоэнергетика тектонитов» (1991, соавтор Балышев СО.).

В 1972 г. Ф.А. Летников защитил докторскую диссертацию на тему «Гранитоиды глы-

бовых областей». В 1978 г. ему присвоено ученое звание профессора по специальности «Петрография, литология и минералогия».

23 декабря 1987 г. Ф.А. Летникова избрали на вакансию для Сибирского отделения АН СССР членом-корреспондентом АН СССР по Отделению геологии, геофизики, геохимии и горных наук - ОГГГГН (геология, геохимия), а 11 июня 1992 г. - действительным членом Российской академии наук (РАН) по тому же Отделению (геология, геофизика и геохимия).

Одно из основных направлений исследований Ф.А. Летникова - геохимия и флюидальный режим эндогенных процессов.

Создана эволюционная флюидальная модель формирования литосферы, впервые доказана необратимая эволюция флюидального режима эндогенных процессов в ходе геологического развития Земли от раннего архея до кайнозоя. Сделано открытие инверсии флюидального режима эндогенных процессов с восстановительного на окислительный на рубеже нижнего и верхнего архея, что существенным образом повлияло на формирование кислородной атмосферы Земли. Выделены глубинные восстановленные, преимущественно углеродные (С-системы), и окисленные малоглубинные, существенно водородные (Н-системы), флюидные фации литосферы. Опубликованы монографии: «Флюидный режим земной коры и верхней мантии» (1977, соавторы Киселев А.И., Карпов И.К.); «Флюидный режим формирования мантийных пород» (1980, соавторы Феоктистов Г.Д., Остафейчук И.М. и др.); «Флюидный режим метаморфизма» (1980, соавторы Глебовицкий В.А., Седова И.С, Вилор Н.В.); «Флюидный режим гранитообразования» (1981, соавторы Леонтьев А.Н., Гантимурова Т.П.); «Петрология, геохимия и флюидный режим тектонитов» (1986, соавторы Савельева В.Б., Балышев СО.).

В результате исследования петрологии литосферы Ф.А. Летниковым сформулировано новое понятие о зрелости континентальной литосферы и дана геохимическая и металлогеническая типизация литосферных плит разной степени зрелости. Создана теория гранитообразования в пределах докембрийских глыбовых областей и разработана модель эволюции гранитогненсовых купольных структур и сопряженных с ними околокупольных депрессий, на базе которой рассмотрены закономерности формирования рудных месторождений в паре «гранитогнейсовый купол —

околокупольная депрессия». Этим вопросам посвящены монографии «Гранитоиды глыбовых областей» (1975) и «Петрология и флюидный режим континентальной литосферы» (1988, соавторы Г.Д. Феоктистов Г.Д., Вилор Н.В. и др.).

При изучении формирования рудных месторождений впервые дано описание поведения золота в гидротермальном процессе в монографии «Золото в гидротермальном процессе» (1981, соавтор Вилор Н.В.). В 1990 г. эта книга переиздана в Австралии.

При рассмотрении вопросов самоорганизации в открытых неравновесных динамических геологических системах Ф.А. Летниковым получены результаты, которые позволили заложить в науках о Земле новое научное направление - синергетика геологических систем - и с новых позиций подойти к анализу целого класса динамических геологических систем. Эти данные впервые опубликованы в монографии «Синергетика геологических систем» (1992).

Всего Феликсом Артемьевичем опубликовано более 250 работ, в том числе 17 монографий, из которых 14 - в соавторстве с другими учеными.

С 1978 по 1980 гг. исполнял обязанности, а с 1980 по 1989 гг. Ф.А. Летников был заместителем директора по науке ИЗК СО РАН.

С 1980 г. - он профессор и заведующий кафедрой минералогии, петрографии и геохимии геологического факультета Иркутского государственного университета. Под его научным руководством защищено 28 кандидатски: и 5 докторских диссертаций.

Ф.А. Летников многократно, начиная с 1966 г., выступал с докладами на нескольких сессиях Международного геологического конгресса (МГК), имеет публикации в трудах МГК. Им сделано много докладов на конференциях и симпозиумах разного рода в СССР, России, Австралии, Англии, Болгарии, Канаде, Китае, Монголии, США, Чехословакии, Японии.

Со времени основания Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), с 1992 г. по 1998 г. был членом Совета РФФИ, с 1994 г. - председатель Центрально-Азиатского фонда геологических исследований, с 1996 г. по 1998 г. - член экспертно-консультационного Совета по науке при Совете министров РФ.

Ф.А. Летников - лидер научной школы «Флюидный режим и геоэнергетика геологических процессов». Основные направления деятельности этой школы: флюидный режим эндогенных процессов; энергетика геологических процессов; синергетика геологических систем.

Ф.А. Летникову присвоено звание: почетного профессора Чаньчуньского университета наук о Земле (Китай) (1996 г.). Он награжден почетными дипломами I, II, и III степени по итогам конкурсов фундаментальных работ Сибирского отделения РАН, Почетным дипломом и золотым знаком 27-й сессии МГК (1984 г.) за отлич*ную организацию* Байкальской геологической экскурсии для делегатов сессии.

Награжден медалями «Ветеран труда» и «Ветеран Сибирского отделения РАН», орденом Почета (1999 г.).

В 2007 г. в составе авторского коллектива за монографию «Экология человека в изменяющемся мире» ему присвоена премия Совета министров Российской Федерации.

Редакция журнала.

Раздел 1
Механика. Транспорт. Машиностроение

УДК 629-752

Хоменко А.П., Лукьянов А.В. Пневматические элементы в схемах управления динамическим состоянием виброзащитных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 6-17.

Рассматриваются возможности построения пространственной системы виброзащиты на основе использования активных элементов в виде шлангов, соединенных через систему золотников. Предложена математическая модель системы. Произведена оценка реакции системы при подключении дополнительного объема, построены частотные характеристики. Разработаны рекомендации по выбору рационгальных параметров.

Илл. - 9. Табл. - 2. Библ. - 3 наим.

УДК 665.01

Белокобыльский С.В., Ситов И.С. Особенности структуры вибрационного поля двумерного объекта в системе обобщенных координат "смещение - угол поворота" и соответствующих координатам обобщенных силах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 18-22.

Рассматриваются возможности динамического гащения колебаний в балочной упругой структуре, на основе детализации представленний о положении узла колебаний. Получены соотношения, позволяющие построить зависимости координат узла от значений параметров системы при заданных частотных свойствах внешнего воздействия.

Илл. - 4. Табл. - 1. Библ. - 3 наим.

УДК 656.001

Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Рычажные механизмы в системах балочного типа // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 23-27.

Предложен подход, позволяющий изменять динамические свойства известных колебательных систем путем введения в структуру рычажных механизмов. При условии малости инерционных параметров рычагов могут быть получены соотношения для определения режимов динамического гашения взависимости от метрики вводимых связей.

Илл. - 5. Библ. - 6 наим.

УДК 69.002.51.192:621.225.2

Кобзов Д.Ю., Дэлэг Д., Жмуров В.В., Лханаг Д. Модернизация конструкции опор гидроцилиндра привода ковша одноковшовых гидрофицированных дорожных и строительных машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 28-33.

Проведённый сравнительный анализ традиционных (проушин) и перспективных (цапф) опор гидроцилиндра с позиции их влияния на его несущую способность, на примере привода рабочего оборудования одноковшовых гидрофицированных ДСМ, показывает целесообразность создания более эффективного привода машин при оптимальном назначении величин эксцентриситетов в опорах исполнительного гидроцилиндра.

Илл. — 10. Библ. — 10 наим.

УДК 621.01:534

Кузнецов Н.К. Гашение упругих колебаний управляемой машины с помощью дополнительных упругих элементов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 34-37.

Актуальной проблемой создания технологического оборудования и машин с программным управлением является проблема ограничения упругих колебаний исполнительных механизмов в переходных режимах работы. Перспективным путем ее решения является использование дополнительных связей активного и пассивного типов. В статье приводятся результаты исследований эффективности дополнительных связей на основе упругих элементов, вводимых в управляемую машину с одной степенью подвижности.

Илл. — 4. Библ. — 3 наим.

УДК 656.001

Банина Н.В., Гозбенко В.Е. Математические модели и динамические свойства связанных систем (вынужденные колебания) // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 37-41.

Введение в колебательные механические системы дополнительных связей в виде механических цепей существенным образом зависит от их вида и состава, хотя разные виды механических цепей могут иметь схожие передаточные функции. К первому классу механических цепей могут быть отнесены различные механизмы, отличительной чертой которых является то, что взаимодействие их элементов носит кинематический характер. Второй класс механических цепей представляет собой систему, состоящую из твердых тел соединенных между собой упругими, а также другими элементами, при этом взаимодействие элементов системы описывается дифференциальными уравнениями. Поэтому в статье рассмотрена технология введения дополнительных связей на структурной схеме и построение на этой основе адекватных моделей, а также их особенности.

Илл. — 8. Библ. — 7 наим.

УДК 656.001

Белых А.В., Белоусов О.Г. Многоступенчатое лабиринтно-винтовое уплотнение вала центробежного насоса // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 42-46.

Проблема герметичности занимает важное место во всех отраслях промышленности и касается многих устройств и машин, в том числе и пожарных. При создании разнообразных образцов техники с подвижными элементами возникает необходимость решения проблемы уплотнений. На основе всестороннего анализа конструкций и видов существующих лабиринтно-винтовых уплотнений авторами теоретически обоснована, разработана и реализована конструкция многоступенчатого лабиринтно-винтового уплотнения.

Илл. — 4. Библ. — 4 наим.

УДК 629.41

Мельниченко О.В., Михальчук Н.Л., Димов А.В., Мельниченко Т.Н. Разработка комплексной автоматической заправки и диагностики букс с постоянным уровнем смазки моторно-осевых подшипников электровозов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 47-54.

В статье показано, что между радиальным зазором моторно-осевого подшипника (МОП) и расходом объема смазки буксы, существует тесная связь, позволяющая создать систему автоматической дозаправки. Предлагается конструктивное решение в виде контактной системы, обеспечивающей контроль зазора МОП, диагностику узла и прогноз остаточного ресурса.

Илл. - 6. Табл. - 1. Библ. - 3 наим.

УДК 656.259.21:621.351

Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Компьютерное моделирование динамики переменного тягового тока в рельсах под катушками АЛСН // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 55-60.

Найдены количественные зависимости изменения коэффициента асимметрии переменного тягового тока под катушками АЛСН по мере движения поезда по рельсовой цепи, ограниченной изолирующими стыками, для наиболее характерных вариантов сочетания продольной и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей.

Илл. — 4. Табл.-1. Библ. — 3 наим.

УДК 622.3.002.5-752

Белокобыльский С.В., Кашуба В.Б. Оценка возможностей динамических взаимодействий рабочего блока и корпуса технологической машины для вибрационного заглаживания бетонных поверхностей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 61-68.

Предложена математичекая модель рабочего органа технологической машины для вибрационного заглаживания бетонных поверхносте. Предполагается, что на предварительном этапе вибрационные параметры взаимодействия с поверхностью бетона малы. Последнее дает возможность учесть особенности упругого закрепления рабочего органа на траверсе, рассматриваемой как упругая балка. Получены формулы для оценки напряженного и деформированного состояний в упругой подвеске.

Илл. - 2. Библ. - 4 наим.

УДК 625.143+629.024

Сигачев Н.П., Тюпин В.Н. Безопасность жизнедеятельности при выбросе бесстыкового железнодорожного пути от температурного и вибродинамического воздействия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 68-71.

На основе закона сохранения энергии определяется стрела изгиба, то есть горизонтальное смещение рельсовой плети и приведены критерии устойчивости пути. Задача решается при условии движения колеса по рельсовой плети, находящейся в температурном поле, превышающем температуру закрепления. Концы рельсовой плети жестко закреплены.

Илл. - 2. Библ. - 6 наим.

УДК 621.09.014

Соболев В.И., Готовский Д.С. Методика расчета на сейсмические воздействия многоэтажных зданий с упругопластическими и кинематическими виброизоляторами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 72-76.

Приведены результаты анализа возможностей методов обеспечения сейсмостойкости многоэтажных зданий и сооружений. Предложена методика компьютерного расчета зданий с сейсмоизоляторами различных типов на сейсмические воздействия.

Илл. - 1. Табл. - 1. Библ. - 14 наим.

Раздел 2
Управление в технических системах. Моделирование

УДК 621.311

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Асташин С.М. Учет возмущений во внешней сети при имитационном моделировании систем тягового электроснабжения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 78-81.

Разработана методика учета возмущений во внешней сети при имитационном моделировании систем тягового электроснабжения. Результаты компьютерного моделирования, прове-

денные применительно к системе электроснабжения западного участка Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, показали применимость предлагаемой методики для решения практических задач, связанных с определением режимов и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения переменного тока. Показано, что учет возмущений во внешней сети особенно актуален для железных дорог в регионах Сибири и Дальнего Востока, схемы внешнего электроснабжения которых характеризуются наличием протяженных ЛЭП 110 — 220 кВ, питающих тяговые подстанции.

Илл. - 4. Библ. - 6 наим.

УДК 656.25.071.84: 62-50.007.0045

Шаманов В.И., Пультяков А.В. Марковская модель процесса технического обслуживания и ремонта устройств автоматики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 81-85.

Разработана обобщенная модель процесса технического обслуживания и ремонта устройств автоматики, позволяющая строить частные модели данного процесса для этих устройств с учетом специфики их работы и особенностей проявления отказов в них. Модель дает возможность вывода расчетных формул для определения вероятностей пребывания устройств в каждом из рассматриваемых состояний.

Илл. — 1. Библ. — 8 наим.

УДК 621.01: 534

Кузнецов Н.К., Перелыгина А.Ю. Исследование эффективности управления колебаниями на основе трехмассовой расчетной схемы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 85-92.

В настоящей статье приводятся исследования условий эффективности активного способа управления колебаниями на основе трехмассовой расчетной схемы, определяются наиболее эффективная структура и параметры дополнительных связей. Для определения эффективности системы гашения применяются интегральные квадратичные оценки упругих колебаний, которые дают наиболее сжатое и четкое представление о характере колебательных движений.

Илл. — 3. Библ. — 4 наим.

УДК 69.002.51.192:621.225.2

Dmitriy Yu.Kobzov, Lhanag D., Deleg D. Dialectical approach to the insight into engineering objects evolution // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 93-99.

No matter how varied engineering objects may be, their working processes, operation and maintenance conditions, the forming of their workability parameters, and reliability indices at any stage of their evolution in the direction of some general development trend are sure to follow dialectics objective laws. And if the latter are disregarded at the initial stage of particular object development this does not guarantee desired positive effect achievement in the end.

Илл. — 6. Библ. — 3 наим.

УДК 330.115

Носков С.И. Точечная характеризация множества парето в линейной многокритериальной задаче // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 99-101.

В статье рассматривается многокритериальная задача линейного программирования. Её решением предлагается считать точку, компромиссную по отношению ко всему множеству Парето.

Библ. — 2 наим.

УДК 621.311

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Арсентьев М.О. Моделирование режимов трехфазно-однофазных электрических систем при синхронных качаниях генераторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 102-105.

Предложена методика моделирования режимов при синхронных качаниях генераторов в трехфазно-однофазных электроэнергетических системах, питающих тяговые подстанции магистральных железных дорог переменного тока. Методика основана на применении математических моделей электроэнергетических систем, сформированных на основе фазных координат. Результаты моделирования режимов системы электроснабжения БАМ показали, что при синхронных качаниях наблюдается значительное снижение напряжения в узловых точках сети и существенный рост несимметрии. Такие режимы необходимо учитывать при планировании режимов электроэнергетических систем и настройке устройств релейной защиты и автоматики.

Илл. - 9. Библ. - 6 наим.

УДК 681.51: 621.398

Мадыев А.П. , Ширапов Д.Д. Определение дисперсии первой производной асимптотически нестационарных сигналов типа переходный режим и анализ ее общих свойств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 106-109.

Рассматривается модель стационарного случайного воздействия (ССВ) содержащего две компоненты. Мгновенные значения реализации ССВ, поступающие на вход линейных динамических звеньев могут меняться: 1) от нуля до установившегося режима; 2) от установившегося значения до нуля; 3) смена знака (инверсия) мгновенных значений значений реализации на противоположные. Исследуются переходные режимы различного типа, получены необходимые оценки для дисперсий, учитывающие параметры ЛДЗ.

Илл. - 1. Библ. - 2 наим.

УДК 64.8

Дмитриева Т.Л. Аппроксимация параметров состояния в задачах оптимизации систем, подверженных нестационарным динамическим воздействиям // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С. 110-114.

Рассматривается задача оптимального проектирования конструкций, подверженных нестационарным динамическим воздействиям. Предлагается метод сопряженных переменных, позволяющий существенные сокращения процедур по сравнению с известными подходами. Автор производит линеаризацию параметров состояния используюя ряды Тейлора. Коэффициенты аппроксимации вычисляются на основе методов анализа чувствительности. Показана большая эффективность дифференцирования через сопряженные переменные перед методом прямого дифференцирования.

Библ. - 1 наим.

Раздел 3
Системный анализ и междисциплинарные подходы в исследованиях

УДК 699: 32/34

Летников Ф.А. Синергетика природных и техногенных воздействий человека // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — №1. — С.117-152.

Статья представляет собой публикацию второй главы монографии "Экология человекав изменяющемся мире", получившей премию правительства Российской Федерации 2006 года в области науки и техники. Авторский коллектив монографии: акад. РАМН Н.А. Агаджанян,

д.ф.м.н. С.И. Александров, к.ф.м.н. О.И. Оптикаева, к.м.н. Т.В. Гаврилова, д.ф.м.н. А.Г. Гамбурцев, к.г.м.н. С.П. Главатских, член-корр. РАН В.А. Грачев, акад. РАМН Т.Б. Дмитриева, д.т.н. Е.А. Жалковский, д.г.м.н. Г.П. Киселев, акад. РАН Ф.А. Летников, к.ф.м.н. О.В. Олейник, д.филос.н. В.Н. Расторгуев, акад. РАМН П.И. Сидоров, акад. РАН и РАМН В.А. Черешнев, член-корр. РАН Ф.Н. Юдахин.

Илл. - 6. Табл. - 1.

УДК 62.031

Хоменко А.П., Елисеев С.В., Засядко А.А. Формирование концепции вибродиагностических методов неразрушающего контроля. Современные представления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С.153-172.

РАзвивается подход, предполагающий построение иерархированной системы оценки динамического состояния технгических объектов при действии вибраций. Концепция обеспечения безопасности выстраивается, с одной стороны, с опорой на соответствующие документы, в виде стандартов ISO (и др.), с другой стороны, обосновывается необходимость разработки технологии создания методики и средств проведения тестовых испытаний. Взаимосогласованное развитие двух подходов обеспечивает рациональное взаимодействие в нормативно-правовом пространстве, определяемом ФЗ "О техническом регулировании".

Илл. - 3. Библ. - 21 наим.

УДК 656.001

Упырь Р.Ю., Насников Д.Н., Логунов А.С. Особенности передачи механических воздействий в механических цепях с ограниченным числом степеней свободы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С.173-181.

В работе рассматривается составление дифференциальных уравнений для колебаний механической цепи из последовательно соединенных пружинами отдельных массоинерционных элементов. Делается предположение о возможности учета упругих свойств не только соседних элементов, но и соответствующих оставшихся частей цепи. В этом случае, можно построить зависимость приведенной жесткости упругого элемента в функции координаты, положения частицы на длине цепи. Последнее позволяет получить математическую модель продольных колебаний балки в несколько иной форме.

Илл. - 10. Библ. - 5 наим.

УДК 519.7:57

Зоркальцев В.И., Казазаева А.В., Мокрый И.В. Модель взаимодействия трех пелагических видов организмов озера Байкал // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С.182-193.

Представлена математическая модель динамики численности популяции трех видов организмов пелагиали оз.Байкал. Получены количественные оценки параметров моделируемых популяций. Дан анализ поведения модели.

Илл. — 5. Табл. — 7. Библ. — 9 наим.

УДК 519.862

Белоусов К.Н., Бутырин О.В., Носков С.И. Методика оценки результатов экспертизы в решении многокритериальных задач // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С.194-196.

В статье приводятся алгоритмы уточнения процедур обработки экспертных высказываний при решении задачи агрегирования локальных критериев в многокритериальной проблеме.

Библ. — 1 наим.

УДК 658.011.56

Печенкина В.В., Арбатская Н.А. Оценка экономико-производственных показателей работы железных дорог на основе дисперсионного анализа // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С.196-198.

В работе на основе однофакторного дисперсионного анализа рассмотрен вопрос об однотипности основных производственно-экономических показателей работы различных железных дорог. И сделаны попытки классифицировать дороги в группы по схожести изменения того или иного основного показателя.

Илл. — 2. Табл. — 2. Библ. — 6 наим.

УДК 656.222.4

Дмитренко А.В. Принципы развития экономики стран мира на перспективу // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — № 1. — С.199-204.

Развивается концепция построения экономики стран, находящихся на более низком уровне развития по сравнению с передовыми странами. Слепое копирование достижения науки и техники может оказаться обременительным для небогатых стран. Рекомендуется развивать те отрасли хозяйственной деятельности, которые могут привести к выигрышу за счет более низкой заработной платы рабочих, сокращения транспортных расходов и, что очень выгодно, развития туризма. Учет особенностей положения страны, уровня ее развития индивидуальны и должны приниматься во внимание.

Илл. - 1. Библ. - 5 наим.

УДК 331.108.4:519

Карнаухова В.К., Краковская Т.А. Выбор новых специализаций для сферы услуг // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. — 2008. — №1. — С.204-206.

Приведена методика выбора новых специализаций на примере сферы услуг, использующая экспертно-статистическую процедуру. Рекомендовано три специализации для рынка труда. Потребность в специалистах по конкретной специализации решается рыночным механизмом «спроса и предложений» с учетом социально-экономического развития региона.

Табл. — 2. Библ. — 2 наим.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Deleg Dorjbal,
Doctor (Ph.D), Professor, Mechanical Engineering Institute, Mongolian University Science and Technology; Монголия

Lhanag Dorligsuren,
Doctor (Ph.D), Professor, Mechanical Engineering Institute, Mongolian University Science and Technology; Монголия

Арбатская Наталья Анатольевна,
ст. бухгалтер РЦС Красноярской железной дороги

Арсентьев Михаил Олегович,
аспирант ИрГТУ

Асташин Сергей Михайлович,
аспирант ИрГУПС

Банина Нина Валерьевна,
к.т.н., ст. преподаватель ИрГУПС

Белокобыльский Сергей Владимирович,
д.т.н., профессор, ректор БрГУ

Белоусов Константин Николаевич,
аспирант ИрГУПС

Белоусов Олег Григорьевич,
к.т.н., доцент, Восточно-Сибирский институт МВД России

Белых Алексей Владимирович,
старший преподаватель, Восточно-Сибирский институт МВД России.

Бутырин Олег Владимирович,
доцент ИрГУПС

Гозбенко Валерий Ерофеевич,
д.т.н., профессор ИрГУПС

Готовский Дмитрий Сергеевич,
аспирант ИрГТУ

Димов Алексей Владимирович,
к.т.н., доцент ИрГУПС

Дмитренко Алексей Васильевич,
д.т.н., проф. СибГУПС

Дмитриева Татьяна Львовна,
к.т.н., докторант ИрГТУ

Елисеев Сергей Викторович,
д.т.н., профессор,

Жмуров Владимир Витальевич,
аспирант кафедры «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ГОУ ВПО «БрГУ».

Закарюкин Василий Пантелеймонович,
к.т.н., доцент ИрГУПС

Засядко Анатолий Алексеевич,
к.т.н., доцент, зам. первого проректора ИрГУПС

Зоркальцев Валерий Иванович,
д.т.н., проф., рук. отдела, ИСЭМ СО РАН

Казазаева Анна Васильевна,
аспирант ИрГУ

Карнаухова Вера Константиновна,
к.х.н., зав. кафедрой сервиса и сервисных технологий ИГУ

Кашуба Владимир Богданович,
преподаватель БрГУ

Кобзов Дмитрий Юрьевич,
к.т.н., доцент кафедры «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ГОУ ВПО «БрГУ».

Краковская Татьяна Алексеевна,
к.т.н., доцент кафедры сервиса и сервисных технологий ИГУ

Крюков Андрей Васильевич,
д.т.н., профессор ИрГУПС

Кузнецов Николай Константинович,
д.т.н., профессор ИрГТУ

Летников Феликс Артемьевич,
академик РАН, зав. лаб. института земной коры СО РАН

Логунов Александр Сергеевич,
аспирант ИрГУПС

Лукьянов Анатолий Валерьянович,
д.т.н., профессор, ИрГУПС

Мадыев Алексей Петрович,
доцент ВСГТУ (г. Улан-Удэ)

Мельниченко Олег Валерьевич,
к.т.н., доцент ИрГУПС

Мельниченко Татьяна Николаевна,
аспирант ИрГУПС

Михальчук Николай Львович,
начальник ОТИЗ ВСЖД

Мокрый Игорь Владимирович,
к.т.н., с.н.с., ИСЭМ СО РАН

Насников Дмитрий Николаевич,
аспирант ИрГУПС

Носков Сергей Иванович,
д.т.н., профессор, директор Института информационных технологий и моделирования ИрГУПС

Перелыгина Александра Юрьевна,
аспирант ИрГТУ

Печенкина Вера Викторовна,
д.э.н., профессор кафедры «Экономики и предпринимательства в строительстве» Сибирского федерального университета

Пультяков Андрей Владимирович,
к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» ИрГУПС

Сигачев Николай Петрович,
д.т.н., профессор, директор Забайкальско-

го института инженеров железнодорожного транспорта, ИрГУПС

Ситов Илья Сергеевич,
аспирант БрГУ

Соболев Владимир Иванович,
д.т.н., профессор ИрГТУ

Трофимов Юрий Анатольевич,
к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» ИрГУПС

Тюпин Владимир Николаевич,
д.т.н., профессор Забайкальского института инженеров железнодорожного транспорта, ИрГУПС

Упырь Роман Юрьевич,
аспирант ИрГУПС

Хоменко Андрей Павлович,
д.т.н., профессор, ректор ИрГУПС

Шаманов Виктор Иннокентьевич,
д.т.н., проф., зав кафедрой «Автоматика и телемеханика» ИрГУПС

Ширапов Даши Донды,
д.ф.-м.н., зав. Кафедрой Вычислительной математики ВСГТУ (г. Улан-Удэ)