



# Министерство Образования и Науки Российской Федерации

# Министерство Транспорта Федеральное агентство железнодорожного транспорта



## Иркутский государственный университет путей сообщения Российская инженерная академия

## Предисловие издателя

### Уважаемые читатели!

Редколлегия журнала представляет очередной выпуск №2(14), продолжая публикации по современным проблемам динамики машин, сейсмической устойчивости зданий и инженерных сооружений. В статьях нашли отражение материалы, полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований Северо-Муйского тоннеля. Серьезное место в представляемых разработках, рfybvf.п исследования, связанные с обоснованием нетрадиционных подходов, ориентированных на структурные методы анализа и синтеза, характерные для теории систем и ее приложений. В этом плане показателен цикл статей, раскрывающих основные положения динамики механических колебательных систем с позиций формирующегося нового научного направления - мехатроники.

Представлены теоретические и прикладные аспекты системного анализа в технических приложениях в области энергетики железнодорожного транспорта, а также результаты современных социально-экономических исследований, отражающих региональные и межрегиональные связи, возможные пути развития международных отношений.

В данном выпуске приводится информация о новых книгах, вышедших из печати в 2006 - 2007 г.г. в издательстве ИГУ.

Редколлегия

# Предисловие издателя

Журнал издается с 2004 г.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ №13-0547 от 24 декабря 2003 г.

Учредитель: Иркутский государственный университет путей сообщени

© Издательство Иркутского Государственного Университета Путей Сообщения



### Министерство Образования и Науки Российской Федерац

Министерство Транспорта Федеральное агентство железнодорожного транспорта

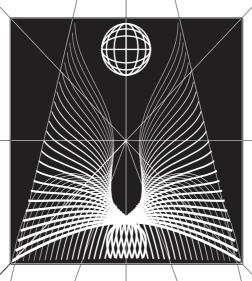


Иркутский государственный университет путей сообщения Российская инженерная академия

# Современные технологии

Систем/ный \анализ

Моде/лиров/ание



# НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

### 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. Бадеников**, 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

# Министерство Образования и Науки Российской Федерации



# Министерство Транспорта Федеральное агентство железнодорожного транспорта



Иркутский государственный университет путей сообщения Российская инженерная академия

# Современные технологии

Систем/ный анализ

Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ	
аздел 1. Механика. Транспорт. Машиностроение.	
<b>Гапанович В.А., Махутов Н.А.</b> Решение проблем конструкционной прочности и техногенной безопасности на железнодорожном транспорте	6
<b>Хоменко А.П., Елисеев С.В.</b> Динамические модели механических цепей	9
Засядко А.А. Электрогидравлические виброзащитные системы	16
<b>Быкова Н.М., Каргапольцев С.К., Пыхалов А.А., Милов А.Е.</b> Некоторые принципы разработки конечно-элементных моделей тоннелей в структурно-неоднородных горных массивах	24
Белокобыльский С.В., Кашуба В.Б. Особенности контактного взаимолействия вибрирующих рабочих органов с бетонной поверхностью в технологиях заглаживания	31
<b>Елисеев С.В., Упырь Р.Ю.</b> Рычажные связи в передаче механических воздействий <b>О.Н., Быкова Н.М., Мироманов И.А., Хрюкин Ю.А.</b>	38
Выделение водонасыщенных пластов в заобделочном пространстве тоннелей электроразведочными методами	47
<b>Ванчиков В.Ц., Холмогоров И.В.</b> Сдвиговая прочность граничного слоя при обтекании жидкости твердой подложки	52
Соболев В.И., Соболев И.В. Конечно-элементный экспресс-анализ сейсмических нагружений в задачах обеспечения безопасности многоэтажных зданий и сложных сооружений	57
Огар П.М., Горохов Д.Б., Ключев Е.А. Герметизирующая способность стыка фрактальных шероховатых поверхностей	63
<b>Огар П.М., Ключев Е.А., Максимова О.В.</b> Упругая характеристика слоистой полуплоскости	66
<b>Четвертнова В.В.</b> Оценка влияния внешних факторов на работу протяженных транспортных объектов с позиции системного подхода	69

# Министерство Образования и Науки Российской Федерации



# Министерство Транспорта Федеральное агентство железнодорожного транспорта



Иркутский государственный университет путей сообщения Российская инженерная академия

Российская инженерная академия			
Современные технолого Системный анализ Моделирование			
СОДЕРЖАНИЕ  Раздел 2. Управление в технических системах. Моделирование.  Махутов Н.А., Гаденин М.М. Многоуровневое регулирование и обеспечение безопасности	74		
Sugisaka M., Loukianov A., Xiongfeng E, Kubik T., Kubik K.B. Develop of an artificial brain LifeRobot  Марюхненко В.С., Комогорцев М.Г., Трускова Т.В. Пути предотврац критических состояний на транспорте  Елисеев С. В., Упырь Р.Ю. Особенности параллельных соединений в механических цепях	oment 87		
Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Сузгаев М.В. Особенности-моделирования износа изоляции тягового трансформато  Раздел З. Экономика. Инновации. Социально-экономические исследовани  Хоменко А.П., Каштанов Ю.Б., Елисеев С.В. Основы стратегии и тактики	451.		
управления региональным центром мониторинга, прогнозирования и управления безопасности транспортных систем  Solskaya I.Y. Structural reform of transport and fundamental research in economic  Jakobson A. Ya. The geopolitical and marketing backgrounds of Russian-Chines relationships	120 cs 134		
Толстых О.Д., Гозбенко В.Е. Структура и содержание тестовой базы (комплексные числа)  ■ Аннотации опубликованных статей  ■ Новые публикации  ■ Сведения об авторах	145 148 153 156		

# Для авторов



# 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;
- 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.

**И**л 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 \*.ВМР, 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-218.

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







Экономика безопасности и качества





Гапанович В.А., Махутов Н.А.

УДК 621.311.1

# РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Железнодорожный, транспорт является важнейшим компонентом транспортного комплекса России, обеспечивающим связь ее регионов внутри России и с внешним миром. Его дальнейшее развитие, предусмотренное рядом решений Президента, Правительства и Совета Безопасности Российской Федерации, обусловливает постановку комплекса принципиально новых задач перед всеми основными звеньями железнодорожного транспорта - фундаментальной, межотраслевой и отраслевой наукой, конструкторскими и технологическими организациями, транспортным машиностроением, эксплуатационными системами и функционированием всего транспортного комплекса. Это в существенной степени относится к программе реализации наиболее значимых научно-технических решений на ближайшую, среднесрочную и долгосрочную перспективу по таким направлениям

- высокоскоростное движение со скоростями 160 450 км/час;
- создание подвижного состава новых поколений с применением усовершенствованной нормативной и правовой базы;
- совершенствование и развитие инфраструктуры железнодорожного транспорта с использованием прорывных технологий в энергетике, телекоммуникациях, системах управления движением;
- использование на железнодорожном транспорте новых специальных материалов, компонентов систем и технологий, созданных в смежных областях (энергетике, авиации, ракетно-космической технике, наноиндустрии, генной инженерии, информатике).

Основы формирования фундаментальных и прикладных исследований, а также использования новейших научных достижений в железнодорожном транспорте по указан-

ным направлениям заложены в Соглашении «О сотрудничестве между Открытым акционерным обществом «Российские железные дороги» и Российской академией наук» от 27 октября 2006 г., № 728.

В соответствии с рядом Федеральных законов («О транспортной безопасности», «О железнодорожном транспорте», «О техническом регулировании», О промышленной безопасности опасных производственных объектов», «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций») и решением совместного заседания Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации от 13 ноября 2003 г. (протокол № 4) предусматривается переход к прогнозированию, планированию и управлению социально-экономическим развитием страны с позиций комплексного обеспечения безопасности на основе применения критериев стратегических рисков. В первую очередь это затрагивает критически важные для национальной безопасности объекты инфраструктуры, в число которых, несомненно, входят объекты железнодорожного транспорта при выполнении ими гражданских и оборонных функций [1,2,3].

Выполненные в нашей стране в последние 15 лет фундаментальные и прикладные разработки по повышению защищенности потенциально опасных объектов от отказов, аварий и катастроф обобщены в 30-ти томах серии «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и на- учно-технические аспекты», являются исходной базой для нового этапа работ по обеспечению технологической, техногенной и экологической безопасности создания и функционирования железнодорожного транспорта.

Подвижной состав и инфраструктура железнодорожного транспорта к началу XXI



века создавались на нормативно-технической базе, сложившейся в последней четверти XX века. Основными критериями их работоспособности при этом служили прочность и назначенный ресурс. Это определило будущий уровень проектирования, изготовления и контроля конструкционных материалов и изделий для железнодорожного транспорта.

Для железнодорожного транспорта XXI века такой подход должен быть развит на новую систему требований, единую для всего материально-технического базиса страны. Эта система включает научное обоснование создания и использования подвижного состава и инфраструктуры по всей современной последовательности критериев «прочности  $\rightarrow$  износостойкости  $\rightarrow$  ресурса  $\rightarrow$  надежности  $\rightarrow$  живучести  $\rightarrow$  рисков  $\rightarrow$  безопасности».

Новые многокритериальные подходы федерального уровня к созданию и безопасному функционированию перспективного подвижного состава и инфраструктуры требуют формирования важнейших этапов научных и прикладных разработок:

- категорирование объектов железнодорожного транспорта по их потенциальной опасности;
- введение классификации аварийных и катастрофических ситуаций на железнодорожном транспорте;
- построение новых систем ранней и аварийной диагностики и мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры;
- создание систем жесткой, функциональной, естественной, охранной и комбинированной защиты подвижного состава и инфраструктуры от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного характера, несанкционированных и террористических воздействий;
- переход на новые принципы обоснования, экспертизы, декларирования, страхования, аудита, обеспечения и повышения безопасности железнодорожного транспорта с использованием критериев риска.

Риски, как количественные показатели безопасности, должны вычисляться через произведения вероятностей возникновении кризисных явлений и неблагоприятных событий (отказов, аварий, катастроф) на сопутствующие им ущербы. Определение рисков является научной задачей, решаемой институтами РАН и ОАО «РЖД». Требование обеспе-

чения безопасности подвижного состава и инфраструктуры железнодорожного транспорта сводится к тому, что определяемые риски не должны превышать уровней приемлемых рисков, обоснованных и назначаемых соответствующими органами управления и надзора. Удовлетворение требований безопасности по критериям рисков требует разработки и реализации комплексов организационных, экономических, конструкционных, технологических, диагностических, мониторинговых и защитных мероприятий. При этом обязательные затраты всех участников функционирования железнодорожного транспорта на обеспечение безопасности и на снижение рисков следует устанавливать в зависимости от уровня реализовавшихся рисков.

В качестве определяющих критериев рисков могут быть выбраны:

- индивидуальные риски потери жизни и здоровья для операторов, персонала и населения;
- интегральные экономические риски от указанных выше кризисных явлений и неблагоприятных событий.

При определении и регулировании безопасности по критериям рисков в расчеты будут вводиться:

- три главных поражающих фактора опасные энергии, опасные вещества и опасные информационные потоки;
- три основных компонента функционирования железнодорожного транспорта: техносфера человек природная среда;
- четыре типа расчетных случаев (штатное функционирование, проектные, запроектные и гипотетические аварийные ситуации);
- принятые в настоящее время основные классы последствий необеспеченности безопасности (глобальные, национальные, региональные, местные, локальные, объектовые).

Одними из первоочередных этапов решения указанных выше проблем прочности, износостойкости, ресурса, живучести и безопасности являются:

- научный анализ состояния и перспектив развития правовой и нормативно-технической базы для переходя к управлению безопасностью по критериям рисков;
- создание единой системы методов проектирования и испытаний, правил и регламентов безопасности, средств достижения приемлемых уровней рисков на всех стадиях жиз-





ненного цикла подвижного состава и инфраструктуры железнодорожного транспорта;

- введение в количественный анализ рисков и безопасности все возрастающей роли человеческого фактора.

Для железнодорожного транспорта Сибирских регионов Российской Федерации существенное значение приобретают такие вопросы, как низкие климатические температуры (до -60°С), повышенная сейсмическая активность горных территорий, мощная сеть геологических разломов, высокая экологическая чувствительность уникальных природных объектов (озеро Байкал, тундровые зоны, зоны вечной мерзлоты), наличие высокорисковой инфраструктуры (протяженные туннели, мосты через мощные Сибирские реки, пересечения транспортных коридоров — магистральные трубопроводы, линии высоковольтных передач).

В этих условиях обеспечение безопасности на железнодорожном транспорте требует учета повышения рисков отказов, аварий и катастроф, обусловленных как подвижным составом, так и инфраструктурой. Они обусловлены ростом вероятности хрупких разрушений стальных конструкций, обрушением тоннелей и мостов, изменением макро-геометрии рельсового пути.

Увеличение скоростей движения поездов требуют новых технологических затрат на новые конструктивно-технологические инженерные решения подвижного состава, рельсов, укладки, инженерных сооружений, учета повышенной динамики движущихся транспортных средств, возрастающих амплитуд переменных напряжений и числа циклов нагружения за единицу времени.

Требования поэтапного повышения общего ресурса основных элементов подвижного состава и путевого хозяйства до 40 лет и более в соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта и более высоких скоростей движения приводит к общему эксплуатационному числу циклов нагружения до  $10^9 \div 10^{10}$  и более и пересмотру традиционного расчета на усталость, живучесть и сопротивление хрупкому разрушению.

Особого внимания для обеспечения безопасности железнодорожного транспорта требует анализ тяжелых катастроф, вызванных несанкционированными и террористическими воздействиями — землетрясениями, падениями на движущиеся или стоящие составы воздушных и космических объектов. Эти катастрофы пока могут рассматриваться как запроектные и гипотетические.

Сказанное выше с учетом упомянутых Федеральных законов и решения Совета Безопасности Российской Федерации является основой перехода к планированию и прогнозированию развития железнодорожного транспорта повышенных ресурса и безопасности с применением критериев риска. При этом снижение рисков до приемлемого уровня потребует новых расходов бюджетных и внебюджетных федеральных, региональных и отраслевых средств на реализацию новой стратегии, которая в свою очередь должна более существенно снизить интегральные ущербы от недоиспользованного ресурса, от плановых и внеплановых ремонтно-восстановительных работ, от отказов, аварий и катастроф. Как показывает опыт других высокорисковых отраслей (атомная и тепловая энергетика, авиация и ракетно-космическая техника, магистральный трубопроводный транспорт) эффективность затрат на снижение рисков уже на первых порах может составлять 200÷500%. Решение такой актуальной стратегической задачи будет способствовать применению на железнодорожном транспорте новейших достижений в научной сфере, в проектировании, технологиях, материаловедении, диагностике, мониторинге, системах управления и защиты от чрезвычайных ситуаций природного, техногенного характера, экстремальных воздействий и террористических проявлений. Это будет несомненным вкладом отечественного железнодорожного транспорта в снижение стратегических рисков для России, в обеспечение ее национальной безопасности и технологической независимости.

Такая задача не может быть решена без создания новой нормативно-правовой базы по проблемам безопасности и без кардинального пересмотра роли человеческого фактора во всех сферах функционирования железнодорожного транспорта от его высшего руководства до конкретного оператора на любом участке его производственной деятельности. Для этого на железнодорожном транспорте, как и в других отраслях, должна быть проведена подготовка и переподготовка специалистов всех уровней и основных направлений по теории и критериям безопасности, по методам и средствам снижения рисков.





Взаимодействие институтов РАН и организаций ОАО «РЖД» по комплексным проблемам безопасности социально-природно-техногенной сферы жизнедеятельности в рамках принятого Соглашения и программ совместных разработок будет способствовать эффективному включению железнодорожного транспорта в обеспечение национальной безопасности, а также в развитие национальной технологической базы с применением критериев стратегических рисков [4,5].

Реализация указанных выше научных основ управления безопасностью железнодорожного транспорта будет осуществляться во исполнение «Стратегических направлений научно-технического развития РЖД» и «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2020 г.». При этом должны учитываться положения «Декларации по вопросам обеспечения безопасности на транспорте в государствах содружества независимых государств» [6,7,8].

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Федеральные законы по безопасности (1993 - 2007 гг.)

- 2. Концепция национальной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 17.12.1997 г. №1300 в редакции Указа Президента РФ от 10.01.2000 № 24.
- 3. Решение совместного заседания Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации от 13 ноября 2003 г. (протокол № 4).
- 4. Стратегические направления научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги».
- 5. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г.
- 6. Декларация по вопросам обеспечения безопасности на транспорте в государствах-участниках Содружества независимых государств (от 18.09.2003 г.)
- 7. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Т. 1-30, М.: МГФ «Знание» 1997-2007 г.г.
- 8. Н.А. Махутов. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Новосибирск: Наука. Ч.1: Критерии прочности и ресурса 494 с. Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности 610 с.

Елисеев С.В., Хоменко А.П.

УДК 656.001

# ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Механические цепи и системы с управляемыми связями широко используются как расчетные схемы в задачах защиты различных объектов от действия ударов и вибраций [1]. В работах [2,3] рассмотрен ряд задач динамического взаимодействия в манипуляционных системах и в расчетах систем подрессоривания и амортизации транспортных средств.

Уравнения движения таких систем могут быть построены в общем виде на основе формализма [4] общего уравнения динамики, имеющего следующий вид:

$$\sum_{i=1}^{k} \delta \overline{z}_{i} \left( m_{i} \overline{W}_{i} - \overline{F}_{i} \right) + \theta \left( \underline{J}_{i} \overline{\varepsilon}_{i} + \overline{\omega}_{i} \times \underline{J}_{i} \overline{\omega}_{i} - \overline{M}_{i} \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \delta q_{i} Q_{i}, \qquad (1)$$

где  $Q_l$  - обобщенная движущая сила, действующая по l-й координате;  $\overline{\theta}_i$ ,  $\overline{\omega}_i$ ,  $\overline{\varepsilon}_i$  - векторы бесконечно малого поворота, угловой скорости и углового ускорения i-й системы координат;  $m_i$ ,  $\underline{J}_i$ ,  $\overline{O_0O}_{ci}$ ,  $\overline{W}_i$ - соответственно масса, тензор инерции (в центре инерции), радиус-вектор и ускорение центра масс звена, определенного пользователем в i-й системе координат;  $\overline{F}_i$ ,  $\overline{M}_i$  - главные векторы внешних сил и моментов (относительно центра масс), действующие на звено, определенное в i-ой системе координат.

Приводя (1) с помощью теоремы Лурье о переставимости конечных поворотов к вариациям обобщенных координат [5]





$$\sum_{i=1}^{k} \delta \overline{z}_{i} \left( \sum_{i=1}^{k} \overline{b}_{i}^{i} \left[ m_{i} \overline{W}_{i} - \overline{F}_{i} \right] + \overline{a}_{i}^{i} \left[ \dot{\overline{K}}_{i} - \overline{M}_{i} \right] \right) =$$

$$= \sum_{l=1}^{n} \delta q_{l} Q_{l}, \qquad (2)$$

и расписывая кинематические характеристики через векторные коэффициенты первого и второго порядков, получим уравнение движе-

$$A(q)\ddot{q} + B(q,\dot{q}) = Q + P, \tag{3}$$

 $A\!\left(q\right)\! \ddot{q} + B\!\left(q,\dot{q}\right) = Q + P, \tag{3}$  где в рамках принятого способа формализации кинематических цепей выражения для элементов матрицы инерции  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , векторы кориолисовых и центробежных сил  $B \in \mathbb{R}^n$  и вектора обобщенных внешних (включая и гравитационную нагрузку) сил имеют вид

$$A_{ls} = \sum_{i=1}^{k} \overline{b}_{l}^{i} m_{i} \overline{b}_{s}^{i} + \overline{a}_{l}^{i} \underline{J}_{i} \overline{a}_{s}^{i},$$

$$P_{l} = \sum_{i=1}^{k} \overline{b}_{l}^{i} \overline{F}_{i} + \overline{a}_{l}^{i} \overline{M}_{i},$$

$$b_{sj}^{l} = \sum_{i=1}^{k} \overline{b}_{l}^{i} m_{i} \overline{b}_{sj}^{i} + \overline{a}_{l}^{i} \left[ \underline{J}_{i} \overline{a}_{sj}^{i} + \overline{a}_{s}^{i} \times \underline{J}_{i} a_{j}^{i} \right],$$

$$B_{l} = \sum_{s=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} b_{sj}^{l} \dot{q}_{s} \dot{q}_{j}, l, s = \overline{1, n}.$$

$$(4)$$

При этом, если из внешних сил учитываются только гравитационные, то следует положить  $\overline{F}_{i} = m_{i}\overline{g}$ ,  $\overline{M}_{i} = 0$ .

В матричной форме записи (с использованием матриц аналогов скоростей центров масс звеньев и векторов ускорений перманентного движения) эти же формулы можно записать в форме

$$A = \sum_{i=1}^{k} \underline{B}_{i}^{T} m_{i} \underline{B}_{i} + \underline{A}_{i}^{T} \underline{J}_{i} \underline{A}_{i},$$

$$B = \sum_{i=1}^{k} \underline{B}_{i}^{T} m_{i} \overline{\beta}_{i} + A_{i}^{T} (\underline{J}_{i} \overline{\alpha}_{i} + \overline{\omega}_{i} \times \underline{J}_{i} \overline{\omega}_{i}), \quad (5)$$

$$P = \sum_{i=1}^{k} \underline{B}_{i}^{T} \overline{F}_{i} + \underline{A}_{i}^{T} \overline{M}_{i}.$$

Каждая компонента вектора кориолисовых и центробежных сил является квадратичной формой с матрицей,  $||b_{si}^l||_{s,l=1}^n$  чьи элементы зависят только от q. Симметризация этой матрицы приводит к общепринятой форме записи вектора В с использованием символов Кристоффеля первого рода:

$$B_{l} = \sum_{s=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} K_{sjl} \dot{q}_{s} \dot{q}_{l},$$

$$K_{sjl} \stackrel{\Delta}{=} \tilde{b}_{sj}^{l} = \frac{1}{2} \left( b_{sj}^{l} + B_{js}^{l} \right) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial A_{ls}}{\partial q_{j}} + \frac{\partial A_{jl}}{\partial q_{s}} - \frac{\partial A_{sj}}{\partial q_{l}} \right\}.$$
(6)

Отметим некоторые свойства коэффициентов динамической модели. Нетрудно показать, что  $A_{ls}\equiv 0$ , если системы координат, соответствующие элементарным преобразованиям с координатами  $q_i$  и  $q_{s'}$  лежат на разных ветвях дерева цепи. Аналогично  $b_{si}^{l} \equiv 0$ , если какие-либо две из трех систем координат, соответствующих элементарным преобразованиям с координатами  $q_{l'}$   $q_{s'}$  и  $q_{i'}$  лежат на разных ветвях дерева. Отметим также, что помимо обычных для механических систем свойств (А положительно определена,  $A_{ls}=A_{sl}$ ,  $\widetilde{b}_{si}^{\;l}=\widetilde{b}_{\;is}^{\;l}$ ) для рассматриваемого класса цепных систем легко доказывается (непосредственным дифференцированием с использованием свойств векторных коэффициентов влияния) справедливость тождества

$$\frac{\partial A_{ls}}{\partial q_{j}} = 0$$
,  $\tilde{b}_{sj}^{l} = -\tilde{b}_{lj}^{s}$ , при  $(v_{i} \le v_{l}) \& (v_{j} \le v_{s})$  (7)

и антисимметричности коэффициентов  $\widetilde{b}_{si}^{\ l}$  по отношению к индексам l, s. Использование перечисленных свойств позволяет хранить в памяти ЭВМ не более чем n(n+1)/2 составляющих A (вместо  $n^2$ ) и не более, чем  $n(n^2 - 1)/3$  составляющих В (вместо  $n^3$ ).

Если матрица  $||\widetilde{b}_{si}^l||_{s,i=1}^n$  коэффициентов симметричная, то матрица коэффициентов  $||b_{si}^{T}||$  таковой не является, и ее симметричные элементы, как нетрудно показать, связаны следующей зависимостью:

$$\widetilde{b}_{sj}^{l} = \widetilde{b}_{js}^{s} + \sum_{i=1}^{k} tr \underline{J} \overline{a}_{l}^{i} \left( \overline{a}_{s}^{i} \times \overline{a}_{j}^{i} \right). \tag{8}$$

Форма уравнений (4) для этого достаточно удобная, так как вся тяжесть вычислений сводится, по сути дела, к формированию вектор--дк коэффициентов влияния первого порядка с помощью структурных полиномиальных матриц [5,6]. При численном моделировании более эффективен способ вычисления В, основанный на разделении движения на начальное и перманентное [7].

Составной частью динамического анализа является определение реакций. Построим в рамках принятого способа формализации кинематических цепей рекуррентные формулы вычисления сил и моментов реакций в осях кинематических пар.

Будем считать, что из системы координат  $\pi_{i'}$  выходят системы  $i_{i'}$   $i_{2'}$  ...,  $i_{i}$  (рис. 1). Элементарные преобразования ф і переводят систему





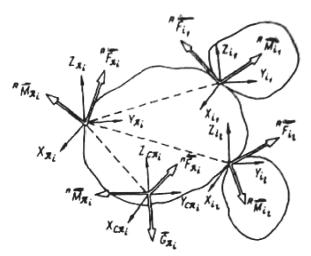


Рис. 1. Формализация силового взаимодействия тел.

 $\pi_{i}$  в  $i_{i}$ . Разорвем цепь в начале  $\pi_{i}$  -й системы координат и составим уравнения кинетостатического равновесия для отброшенной части цепи. Действие оборванной части цепи на тело, заданное в  $\pi_{i}$  -й системе координат, заменим силой реакции  $\overline{F}_{\pi i}^{\ R}$ , приложенной к точке  $O_{\pi i}$ , и моментом сил реакций, вычисленным относительно точки  $O_{\pi i}$ :  $\overline{M}_{\pi i}^{\ R}$ .

Относительно внутренних реактивных сил, сосредоточенных в точках  $O_{i_1}, O_{i_2}, ..., O_{i_l},$  примем следующее соглашение о знаках:

будем считать, что на тело  $i_{_{\!\!p}}$  со стороны тела  $\pi_{_i}$  действуют  $\overline{F}_{i_p}^{\,R}$ ,  $\overline{M}_{i_p}^{\,R}$ и, следовательно, на тело  $\pi_{_i}$  со стороны тела  $i_{_{\!\!p}}$  действуют  $-\overline{F}_{i_p}^{\,R}$ ,  $-\overline{M}_{i_p}^{\,R}$ . С учетом этого соглашения уравнения кинетостатического равновесия можно представить в следующем виде:

$$\overline{F}_{\pi_{i}}^{R} = -\left(\overline{F}_{\pi_{i}}^{u} + \overline{F}_{\pi_{i}}^{b} + \overline{G}_{\pi_{i}}\right) + \sum_{p=1}^{l} \overline{F}_{i_{p}}^{R}, \qquad (9)$$

$$\overline{M}_{\pi_{i}}^{R} = -\left(\overline{M}_{\pi_{i}}^{u} + \overline{M}_{\pi_{i}}^{b}\right) - \overline{\rho}_{\pi_{i}} \times \left(\overline{F}_{\pi_{i}}^{u} + \overline{F}_{\pi_{i}}^{b} + \overline{G}_{\pi_{i}}\right) + + \sum_{p=1}^{l} \overline{M}_{i_{p}}^{R} + \overline{d}_{i_{p}} \times \overline{F}_{i_{p}}^{R},$$

где  $\overline{F}_i^{\ b}$ ,  $\overline{M}_i^{\ b}$  - задаваемые пользователей внешние силы и моменты, (относительно центра масс), действующие на звено, определенное i-й системе координат. Входящие в (9) главный вектор и главный момент сил инерции, а также вектор силы тяжести

$$\overline{G}_{i} = m_{i} \overline{g}, \quad \overline{F}_{i}^{u} = -m_{i} \overline{W}_{i}, 
\overline{M}_{i}^{u} = -\underline{J}_{i} \overline{\varepsilon}_{i} - \overline{\omega}_{i} \times \underline{J}_{i} \overline{\omega}_{i}, 
\overline{d}_{i_{p}} \underline{\Delta} \overline{O_{\pi_{i}} O}_{i_{p}} = (1 - \delta_{i_{p}}) \varphi_{i_{p}} \overline{e}_{i_{p}}$$
(10)

вычисляются при прямом проходе дерева цепи с применением рекуррентных формулу [8]. Для повышения вычислительной эффективности и автоматического учета в (10) сил тяжести следует положить  $\overline{W}_{O_0} = \overline{g}$ .

Зная силы и моменты, действующие на звенья, последовательным применением (9) при обратном проходе дерева цепи в направлении от терминальных систем координат дерева к нулевой, можно определить силы и моменты реакций в сочленениях. В зависимости от типа кинематической пары при  $\eta_i = 1$  проекции силы (или момента) реакции на ось элементарного преобразования  $\phi_i$  определяют выражение для соответствующей обобщенной движущей силы

$$Q_{\lambda_i} = \left\{ \delta_i \overline{M}_i^R + (1 - \delta_i) \overline{F}_i^R \right\} \overline{e}_i. \tag{11}$$

Заметим, что последовательное применение рекуррентных формул, приведенных в [8], а также (9-11) при  $\phi_i = 0$  дает эффективный способ вычисления вектора B+G. При реализации вычислительных алгоритмов проецированием (9), (10) на оси системы кординат  $\mathbf{s}_0$  или  $\mathbf{s}_{\pi i}$  получим рекуррентные формулы для определения реакций соответственно в осях базовой системы координат или же в связанных осях. Таким образом, имеем два типа, удобных для программирования рекуррентных соотношений.

Заметим также, что с точки зрения вычислительной эффективности реактивные силы и моменты целесообразно вычислить в проекциях на оси связанных систем координат, поскольку именно в них, задается исходная информация о геометрических и массоинерционных характеристиках звеньев. С учетом сделанных замечаний алгоритмическая реализация метода может быть описана следующим образом.

Введем в рассмотрение матрицу  $X \underline{\triangle} \Big( \bar{x}^0 \vdots \bar{x}^1 \vdots \dots \vdots \bar{x}^k \Big)$ , где  $\bar{x}^i \in R^{15}$  и k - число сис-

тем координат в дереве цепи. Алгоритм решения первой задачи динамики древовидной кинематической цепи заключается в последовательном заполнении элементов матрицы различными физическими величинами: сперва угловыми скоростями и ускорениями и линей-





ными ускорениями, а затем силами и моментами реакций.

Алгоритм состоит из следующих основных этапов.

Этап 1. Двигаясь по дереву цепи в направлениях от нулевой системы координат к терминальным, заполняем матрицу X так, чтобы  $\bar{x}^i = \left( \overline{W}_{O_i}^{(i)} - \bar{g}^{(i)} \vdots \overline{\omega}_i^{(i)} \vdots \bar{\varepsilon}_i^{(i)} \vdots 0 : 0 \right)$ . На вход этому этапу подается вектор  $h\underline{\triangle}(h_1,\dots,h_k)$  номеров уровней вершин в дереве цепи. Обозначим  $N_h = \max_{i=1,k} h_i$ , и примем, что  $h_i > 0$ , если i-я вершина еще не обрабатывалась на первом этапе ал-

горитма, и  $h_i < 0$  - в противном случае.

Схема организации вычислений может быть такой. Полагаем  $\bar{x}^0 = \left(-\bar{g}:0:0:0:0\right)$ . В цикле по числу уровней вершин дерева цепи от j=1 до  $N_h$  организуем внутренний цикл по числу систем координат i=1 до k. При этом, если  $h_i=j$ , выполняем следующие действия: полагаем  $h_i=-h_i$ ; определяем значение  $\pi_i$ ; извлекаем из  $\overline{\chi}^{\pi_i}$  значения  $\overline{\omega}_{\pi_i}^{(\pi_i)}, \overline{\varepsilon}_{\pi_i}^{(\pi_i)}, \overline{W}_{O_{\pi_i}}^{(\pi_i)}$ ; вычисляем значения  $\overline{\omega}_i^{(i)}, \overline{\varepsilon}_i^{(i)}, \overline{W}_i^{(i)}$  и заносим их в  $\overline{\chi}^i$  [12].

Этап 2. Двигаясь по дереву цепи в направлениях от терминальных систем координат к нулевой, заполняем матрицу X так, чтобы  $\overline{x}^{(i)} = \left(\overline{W}_{O_i}^{(i)} - \overline{g}^{(i)} \vdots \overline{\omega}_i^{(i)} \vdots \overline{\varepsilon}_i^{(i)} \vdots^R \overline{F}_i^{(i)} \vdots^R \overline{M}_i^{(i)}\right)$ . Для более эффективной организации работы алгоритма введем в рассмотрение вектор  $S \triangleq (S_o, S_1, ..., S_k)$ , где  $S_i = 0$ , если i-я вершина дерева цепи уже обрабатывалась на втором этапе алгоритма, и  $S_i = 1$ - в противном случае.

Схема организации вычислений может быть такой. Главный цикл от j=1до k образуем по числу систем координат. Если  $t_i=1$ , т. е. i-я вершина терминальная, то выполняем следующие действия: полагаем  $S_i=0$  и

$$\begin{array}{l}
{}^{R}\overline{F}_{i}^{(i)} = -\left\{{}^{u}\overline{F}_{i}^{(i)} + {}^{b}\overline{F}_{i}^{(i)} + \overline{G}_{i}^{(i)}\right\}, \\
{}^{R}\overline{M}_{i}^{(i)} = -{}^{u}\overline{M}_{i}^{(i)} - {}^{b}\overline{M}_{i}^{(i)} - \overline{r}_{i}^{(i)} \times \\
\times \left({}^{u}\overline{F}_{i}^{(i)} + {}^{b}\overline{F}_{i}^{(i)} + \overline{G}_{i}^{(i)}\right);
\end{array} (12)$$

последовательно двигаясь вдоль ветви дерева, соединяющей данную терминальную вершину с нулевой, извлекаем из  $\overline{x}^{\pi_i}$  значения  $\overline{W}_{O_i}^{(i)} - \overline{g}^{(i)}, \overline{\varepsilon}_i^{(i)}, \overline{\omega}_i^{(i)};$  вычисляем  ${}^u\overline{F}_{\pi i}^{(\pi_i)}, {}^u\overline{M}_{\pi i}^{(\pi_i)},$   ${}^b\overline{F}_{\pi i}^{\pi_i}, {}^b\overline{M}_{\pi i}^{\pi_i}, \overline{G}_{\pi i}^{(\pi_i)};$  полагаем

$$^{R}\overline{F}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} = ^{R}\overline{F}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} + \left\{ \delta_{i}M(\varphi_{i})^{R}\overline{F}_{i}^{(i)} + (1 - \delta_{i})^{R}\overline{F}_{i}^{(i)} \right\} - \\
- S_{\pi_{i}} \left\{ ^{u}\overline{F}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} + ^{b}\overline{F}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} + \overline{G}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} \right\}, \\
^{R}\overline{M}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} = ^{R}\overline{M}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} + \left\{ \delta_{i}M(\varphi_{i})^{R}\overline{M}_{i}^{(i)} + (1 - \delta_{i})^{R}\overline{M}_{i}^{(i)} \right\} + (13) \\
+ (1 - \delta_{i})\varphi_{i}\overline{e}_{i}^{(i)} \times ^{R}\overline{F}_{i}^{(i)} - S_{\pi_{i}} \left\{ ^{u}\overline{M}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} + ^{b}\overline{M}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} \right\} - \\
- S_{\pi_{i}}\overline{f}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} \left\{ ^{u}\overline{F}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} + ^{b}\overline{F}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} + \overline{G}_{\pi_{i}}^{(\pi_{i})} \right\};$$

полагаем  $S_{\pi_i}=0,\ i=\pi_i$ и повторяем вычисления по формулам (12), (13) до тех пор, пока i не станет равной нулю. После того как будут обработаны все терминальные вершины, матрица X будет полностью сформирована.

**Этап 3.** В вычислительном плане заключается в последовательном формировании элементов вектора обобщенных управляющих сил по формуле (11).

Используя описанную выше кинетостатическую процедуру, можно чисто алгоритмическим путем формировать коэффициенты уравнений движения с помощью модуля  $DIN(q,\dot{q},\ddot{q},g,f,Q)$ , осуществляющего преобразование информации по схеме

$$q, \dot{q}, \ddot{q}, g, f \rightarrow Q$$

где f - блочный вектор внешних сил и моментов. В частности, применение DIN1(q,0,0,g,0,G) дает на выходе вектор обобщенных сил тяжести, DIN1 $(q,\dot{q},0,0,0,B)$  - вектор кориолисовых и центробежных сил, DIN1 $(q,\dot{q},0,g,f,B-P)$  - член B - P и т. д. [2].

Аналогичным образом можно вычислить и элементы матрицы инерции механизма. Обозначим через  $\bar{z}_i \in R^n$  единичный орт с единицей в i-м элементе и нулями в остальных. Тогда соответствующим обращением к DIN1 (q, 0,  $\bar{z}_i$ , 0, 0,  $\bar{a}_i$ ) можно вычислить  $a_i-i$ -й столбец матрицы А. Обращаясь, таким образом, к DIN1 при i=1, п, найдем все столбцы  $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \ldots, \bar{a}_n$  матрицы А.

Для механических систем матрица А положительно определена и симметрична. Кроме того, она может быть существенным образом разряжена нулевыми элементами ввиду возможной независимости отдельных подсистем. Так, например, для двух механических цепей, осуществляющих координированное перемещение точки соединения, матрица инерции системы имеет блочно-диагональный вид. Применение алгоритма «постолбцового» вычисления матрицы А, не учитывающего симметричность и разряженность



матрицы, приводит к неоправданным вычислительным затратам.

Для устранения указанного недостатка можно предложить другой алгоритм вычисления матрицы инерции, учитывающий ее симметричность и разряженность. Алгоритм основан на предположении, что в пределах каждой отдельной ветви дерева цепи звенья верхних уровней при фиксированных («замороженных») звеньях нижних уровней можно рассматривать как отдельные ветви с неподвижными точками опоры, расположенными в «замороженных» звеньях. Для формализованного описания алгоритма, помимо ранее указанных данных, понадобятся следующие:

 $\Re \underline{\underline{\triangle}} (\rho_1, \rho_2, ..., \rho_n)^T$ , где  $\rho_i$  — номер элементарного преобразования, которое соответствует обобщенной координате  $q_i$ ;

 $\Theta \underline{\underline{\Delta}} \left( \theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n \right)^T$  - вектор уровней обобщенных координат, который строится так же, как и вектор  $\Re$ , но только по дереву цепи, из которого удалены элементарные преобразования, соответствующие постоянным поворотам и переносам;

 $\Xi \underline{\Delta} (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T$  - вектор «активности» обобщенных координат, где  $\xi_i = 1$ , если данная обобщенная координата «заморожена» (т. е.  $\dot{q}_i = \ddot{q}_i = 0$ ), и  $\xi_i = 0$  в противном случае;

 $A\underline{\underline{\triangle}} ig( lpha_1, lpha_2, \ldots, lpha_k ig)^T$  - вектор «активности» систем координат, где  $lpha_i = 1$ , если і-я система координат «заморожена» (т. е. ее можно принять за стойку), и  $lpha_i = 0$  в противном случае;

 $Z\underline{\triangle}||\zeta_{ij}||_{i,j=1}^k$  - матрица путей, связывающая элементарные преобразования (дуги графа) с системами координат (вершинами графа), где  $\zeta_{ij}=1$ , если дуга  $\phi_j$  лежит на пути, связывающем вершины i и 0, и  $\zeta_{ij}=0$  в противном случае.

Перед началом работы алгоритма все элементы матрицы инерции полагаются нулевыми. Векторы «активности» Е и А в начальном состоянии также нулевые. При работе алгоритма обобщенные ускорения всех предыдущих уровней, считаем «замороженными».

Также «замороженными» считаем соответствующие им системы координат. Далее используем модифицированный DIN1( $q,0,\ddot{q},0,0,Q$ ), приводящий силы и моменты реакций только к «замороженным» системам координат и вычисляем только те обоб-

щенные силы, которые соответствуют «незамороженным» системам координат. После этого, анализируя матрицу путей Z, заполняем те строки и столбцы матрицы A, которые соответствуют единичным обобщенным ускорениям. Алгоритмы заканчивают работу, когда обработаны все  $N_0$  уровней обобщенных координат, где  $N_0 = \max_{l=1,n} \theta_l$  [2].

Схема вычислений может быть организована следующим образом. Построим главный цикл от i=1 до  $N_{\scriptscriptstyle 0}$  по числу уровней обобщенных координат, внутри которого выполняем следующие действия:

- 1)  $\forall j$  = 1, n определяем: если  $\theta_{\ j}$  = i, то  $\ddot{q}_{\ j}$  =1 и  $\alpha_{\rho_{\ j}}$  =1, иначе  $\ddot{q}_{\ j}$  =0;
- 2) обращением к модифицированному DIN1(q, 0,  $\ddot{q}$ , 0, 0, Q) вычисляем обобщенные силы, соответствующие «незамороженным» обобщенным координатам;
- 3) заполнение матрицы инерции проводится так, что  $\forall j=1$ , п такого, что  $\xi_j=0$  (т. е. j-я обобщенная координата «не заморожена»),  $\forall l=1$ , п такого, что  $\ddot{q}_j=1$ , определяется соответствующее значение  $\zeta_{\rho_j,\rho_l}$  При правильной нумерации графа обобщенной координаты  $\mathbf{q}_j$  соответствует дуга  $\phi_{\rho_j}$  и вершина  $S_{\rho_j}$  с тем же номером, Поэтому, если  $\zeta_{\rho_j,\rho_l}=1$ , то дуга  $\phi_{\rho_l}$  лежит на пути, связывающем вершины 0 и  $\rho_j$ . В этом случае полагаем  $a_{jl}=a_{lj}=Q_j$ . Если же  $\zeta_{\rho_j,\rho_l}=0$ , то дуги  $\phi_{\rho_j}$  и  $\phi_{\rho_l}$  лежат на разных ветвях от вершины с номером  $\rho_j$ , и поэтому полагаем  $a_{jl}=a_{lj}=0$ ;
- 4) «замораживаем» обобщенные координаты, соответствующие единичным ускорениям (т. е.  $\forall j=1$ , п полагаем  $\xi_j=1$ , если  $\ddot{q}_j=1$ ), и переходим на обработку последующего уровня обобщенных координат.

Помимо явного вычисления коэффициентов уравнений динамики описанную выше процедуру кинетостатического расчета можно приспособить и для непосредственного определения обобщенных ускорений и реакций дополнительных связей, используя ее на этапе интегрирования уравнений движения

$$\begin{vmatrix} A(q) & -D^{T}(q) \\ -D(q) & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Q - B(q, \dot{q}) - P \\ C(q, \dot{q}) \end{vmatrix}, \quad (14)$$





где  $D(q) \in R^{m \times n}$  - якобиева матрица уравнений дополнительных связей;  $\lambda \in R^m$  - вектор реакций дополнительных связей;  $C(q,\dot{q}) \in R^m$  - вектор членов, зависящих от скоростей в дважды продифференцированных уравнениях связей.

Вектор Q считается заданным. Вектор B+Pвычисляется обращением  $DINl(q,\dot{q},0,g,I,B+P)$  для связей по совпадению координатных базисов; при этом же обращении на этапе прямого прохода дерева определяется член  $C(q,\dot{q})$  как разность перманентных ускорений соответствующих базисов. Член  $A(q)\ddot{q} - D^T\lambda$  формируется обращением к  $DINI(q, 0, \ddot{q}, \lambda, A\ddot{q} - D^T\lambda)$  для связей по совпадению координатных базисов; на этом же этапе прямого прохода дерева определяется член  $D\ddot{q}$ как разность начальных ускорений соответствующих базисов по рекуррентным формулам [2,8].

Обозначим вектор правых частей системы (14) через Ү. Обычный способ решения системы (14) заключается в обращении блочной матрицы  $\widetilde{A}$ , стоящей перед блочным вектором  $x\underline{\Delta} \Big( \ddot{q}^T \vdots \lambda^T \Big)^T$ . Однако для этого требуется в явном виде вычислять элементы матрицы  $\widetilde{A}$ .

Чтобы избежать этого, для нахождения х можно использовать метод сопряженных направлений, основной вычислительной операцией которого является умножение матрицы на вектор. Поэтому для решения системы линейных уравнений (14) методом сопряженных направлений не требуется знать явный вид матрицы  $\widetilde{A}$ , а требуется уметь вычислять  $\forall x \in R^{n+m}$  вектор  $\widetilde{A}$ х, что и делает модуль DIN1[2].

Метод сопряженных направлений может быть использован для решения системы  $\widetilde{A}x=Y$ , когда  $\widetilde{A}$  - симметрическая положительно определенная матрица. Этим условиям удовлетворяет матрица системы (14). Вычислительные операции метода в данном случае описываются следующей схемой:

—задаем начальное приближение  $x^0$  и точность вычислений  $\epsilon$ ;

—определяем 
$$r^0 = \widetilde{A}x_0 - y$$
,  $d^0 = -r^0$ ,  $t_0 = (r^0, r^0) / (d^0, \widetilde{A}d^0) x^1 = x^0 + t_0 d^0$ ;

—при k = 1, n последовательно вычисляем

$$r^{k} = r^{k-1} + t_{k-1} \tilde{A} d^{k-1},$$

$$\beta_{k-1} = (r^{k}, r^{k}) / (r^{k-1}, r^{k-1}),$$

$$d^{k} = -r^{k} + \beta_{k-1} d^{k-1},$$

$$x^{k+1} = x^{k} + \{(r^{k}, r^{k}) / (d^{k}, \tilde{A}_{k} d^{k})\} d^{k}$$

до тех пор, пока не выполнится условие  $\left(r^{k}, r^{k}\right) \leq \varepsilon$ .

Как упоминалось выше, достоинством данного метода является нахождение обобщенных ускорений и реакций связей без явного вычисления матрицы инерции. В этом он аналогичен методу наименьшего принуждения Гаусса, в котором ускорение находится путем минимизации «меры принуждения» [9]. Как отмечается в [10], при моделировании непрерывных траекторий методы неявного вычисления ускорений дают ощутимое преимущество, заключающееся в использовании одной-двух итераций для уточнения ускорений, так как всегда имеется хорошее начальное приближение - ускорение на предыдущем шаге.

В заключение остановимся кратко на расчете ударных режимов. Будем считать, что на систему, описываемую уравнениями (3), внезапно накладываются голономные связи, выражающие, например, совпадение координатных базисов. Интегрируя на малом промежутке ударного времени уравнение динамики (3) и дополняя полученную систему уравнениями связей по скоростям в первый после удара момент времени, будем иметь

$$A\dot{q}^{+} - D^{T}\Lambda = A\dot{q}^{-} - \Gamma, D\dot{q}^{+} = 0,$$
 (15)

откуда находятся обобщенные скорости  $\dot{q}^+$  в первый после удара момент времени ( $\dot{q}^-$  доударные скорости) и ударные импульсы  $\Lambda$  реакций связей. Здесь  $\Gamma$  - известные ударные импульсы внешних сил и моментов, приведенные к обобщенным координатам.

Анализ ударных режимов завершает определение импульсов сил и моментов реакций в осях кинематических пар манипуляторов. При этом для каждого из них, в предположении идеальности связей, реализующих кинематические пары, выполняется (назовем ее условно кинетостатической) двухэтапная про-





цедура, которую для свободной от связей системы опишем следующим образом.

На первом этапе при прямом проходе дерева цепи (от корня вершинам), считая  $\dot{q}^+$  заданным, рассчитываются импульсы инерционных сил и моментов  $\overline{F}_i^{\ u}=-m_i\Delta\overline{V}_i$ ,  $\overline{M}_i=-J_i\Delta\overline{\omega}_i$ . Для определения скачков угловых и линейных скоростей  $\Delta\overline{\omega}_i$ ,  $\Delta\overline{V}_i$ , используются рекуррентные формулы (3), в которых согласно классической схеме удара следует положить  $\Delta\phi_i=0$ ,  $\Delta\dot{\phi}_i=\eta_i\Delta\dot{q}_{\lambda_i}$ ,  $\Delta\ddot{\phi}_i=0$ ,  $\overline{\Delta O_iR_i}=0$ .

На втором этапе, считая импульсы внешних сил и моментов  $\overline{F}_i^{\ b}$ ,  $\overline{M}_i^{\ b}$  заданными (сюда относятся и импульсы ударных реакций  $\Lambda$ ), двигаясь в обратном направлении прохода дерева (от вершин к корню), рассчитываются импульсы внутренних сил и моментов реакций. Интегрируя (9)-(11) и пренебрегая импульсами конечных сил тяжести, будем иметь

$$\overline{F}_{\pi_{i}}^{R} = -\overline{F}_{\pi_{i}}^{u} - \overline{F}_{\pi_{i}}^{b} + \sum_{p=1}^{I} \overline{F}_{i_{p}},$$

$$\overline{M}_{\pi_{i}}^{R} = -\overline{M}_{\pi_{i}}^{u} - \overline{M}_{\pi_{i}}^{u} - \rho_{\pi_{i}} \times \left(\overline{F}_{\pi_{i}}^{u} + \overline{F}_{\pi_{i}}^{b}\right) + + \sum_{p=1}^{I} \overline{M}_{i_{p}}^{R} + \overline{d}_{i_{p}} \times \overline{F}_{i_{\pi}}^{R},$$

$$\vartheta_{\lambda_{i}} = \left\{\delta_{i} \overline{M}_{i}^{R} + \left(1 - \delta_{i}\right) \overline{F}_{i}^{R}\right\} \overline{e}_{i},$$
(16)

где  $\theta_{\lambda_i}$  - приведенные к обобщенной координате  $q_i$  суммарные ударные импульсы от инерционной и внешней нагрузок. Так же, как и для (9), (10), проецируя (16) на оси системы координат  $\mathbf{s}_0$  или  $\mathbf{s}_{\pi_i}$ , получим два типа удобных для программирования рекуррентных соотношений, определяющих реактивные импульсы в осях базовой системы координат или же в связанных осях.

## **ВИБЛИОГРАФИЯ**

- 1. Елисеев С.В. Структурная теория виброзащитных систем. Новосиирск. Наука. 1978. 232 с.
- 2. Елисеев С.В., Свинин М.М. Математическое и программное обеспечение в исследованиях манипуляционных систем. - Новосибирск. Наука. - 1992. - 297 с.
- 3. Хоменко А.П. Динамика и управление в задачах виброзащиты и виброизоляции подвижных объектов. - Иркутск. ИГУ. - 2000. -295 с.
- 4. Виттенбург И. Динамика систем твердых тел. Москва. Мир. 1980. 294 с.
- 5. Кулаков Ф.М., Смирнова Т.И. Динамические структуры величин в исследованиях робототехнических систем // Робототехнические системы. Л.: ЛНИВЦ. 1984. С.6-21.
- 6. Vukobratovich M., Kirsansky N. Real-time dynamic of manipulation robots. Berlin: Springer. 1985. 239 c.
- 7. Артоболевский И.И., Овакимов А.Г., Знаменков О.К. Уравнения движения манипулятора с учетом инерции вращательных приводов // Машиностроение. 1977. №6. С. 3 -11.
- 8. Елисеев С.В., Хоменко А.П. Формирование точностной модели механической цепи манипулятора // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск. ИрГУПС. 2007. №1(13). С. 6-13.
- 9. Верещагин А.Ф. Принцип наименьшего принуждения Гаусса для моделирования не ЭММ динамики роботов-манипуляторов // Докл. АН СССР. 1975. Т.220. №1. С.51-53.
- 10. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. М.: Наука. 1978. 378с.





Засядко А.А. УДК 656.001

# ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ВИБРОЗАЩИТНЫЕ СИСТЕМЫ

Разработка новых методов и средств защиты от вибрационных и ударных воздействий - важнейшая техническая задача. Виброзащита является неотъемлемой частью комплексной проблемы по совершенствованию качества, увеличению надежности и долговечности машин и оборудования, обеспечению безопасных условий трула.

Увеличение скоростей движения, производительности и мощности машин, использование новых технологических процессов и операций сопровождается ростом интенсивности и расширением диапазона динамических нагрузок. В связи с этих вибрации и удары становятся все более важными характеристиками внешней среды, окружающей людей, и чувствительных к динамическим воздействиям конструкции, машин и приборов [1], [2].

Первоочередной задачей является уменьшение уровня вибраций и ударов. В противном случае дополнительные динамические нагрузки вызывают большие механические напряжения в элементах конструкций, снижают степень надежности, уменьшают производительность и ухудшают качество работы машин.

В последние годы появились и стали применяться активные виброзащитные системы; в их состав, в отличие от широко известных "классических" - пассивных систем, включены вспомогательные источники энергии и управляемые дополнительные связи.

В настоящее время результаты исследований, проведенных как российскими, так и зарубежными учеными, предполагают успешное использование активных систем для решения ряда задач виброзащиты, главным образом, в низкочастотном диапазоне вибрационных воздействий, а также в дополнение к пассивным системам, образуя гибридный вариант для коррекции динамических свойств последних.

Теории и практике защиты различного рода объектов от внешних возмущений посвящено значительное число работ, в которых выбор параметров виброзащитных систем и их элементов носит, как правило, противоречивый характер, вызванный свойствами используемых механических систем [3].

Несовместимость требований, предъявляемых к механическим системам при изменении возмущающих воздействий по времени (установившееся, нестационарное), интенсивности, диапазону (частот, амплитуд), типу (вибрационные, ударные, детерминированные, случайные) или перемене состояния объекта (по массе, статическим нагрузкам и т.д.), затрудняет эффективное решение задач виброзащиты.

Теория активных ВЗС рассматривает вопросы анализа и синтеза виброзащитных систем с единой точки зрения, основанной на общности задач виброзащиты (виброизоляции) и автоматического регулирования. При этом, получение желаемых свойств систем может осуществляться не только по пути использования некоторых эффектов и явлений, присущих инерционным, демпфирующим и упругим, элементам, но и на основе целенаправленного формирования структуры систем включением дополнительных активных и пассивных связей.

Разработка активных средств представляет собою системный подход к решению задач виброзащиты [4],[5].

Известны самые разнообразные конструкции регулируемых устройств. Для выяснения их преимуществ и недостатков, выявления основных направлений исследований и разработок для решения названных задач может быть предложена систематизация регулируемых виброзащитных систем по нескольким классификационным признакам.

Интересным для постановки задачи является класс систем с автоматических регулиро-





ванием, который можно разделить на пять групп:

- -ВЗС с автоматической поднастройкой;
- -ВЗС стабилизации;
- -ВЗС с сервосвязями;
- -ВЗС с переменной структурой;
- -Самонастраивающиеся ВЗС.

Анализ работ (в области виброзащиты) показывает, что применение систем стабилизации предоставляет большие возможности в сравнении с пассивными ВЗС, не вызывая при проектировании на современном уровне развития техники особых затруднений. Выбор типа устройств, по природе используемых в них сигналов, строго не регламентируется, однако, от того, с помощью» каких физических явлений реализуется тот или иной принцип управления, существенно зависят и качественные показатели процессов виброзащиты, и эксплуатационные особенности систем, и ряд других важных свойств.

В работе [6] представлен обзор широко распространенных конструктивных решений - пневматических и гидравлических систем. Показано, в обоснование системного подхода, что все известные разработки в области активных систем любой природы сводятся, в структурном плане, к введению в обычную виброзащитную систему дополнительных связей. При этом наиболее эффективно и качественно решаются в общем случае задачи преобразования и использования управляющей информации с помощью электрогидравлических активных устройств.

В представленной работе исследуются, главным образом, характеристики электрогидравлических виброзащитных систем (ЭГАВЗС), определяемые наличием в системе дополнительных активных связей при различных законах управления.

I. В работе автора [7] излагаются элементы теории активных систем в приложении к одномассовой виброзащитной механической системе с идеальной активной обратной связью; рассмотрены вопросы изменения свойств активных виброзащитных систем (АВЗС) при некоторых алгоритмах регулирования для вибрационных и ударных кинематических возмущений.

Применяемый метод структурных моделей, в основе которого лежит понятие о передаточных функциях, выражающих зависимость между возмущениями и переменными

параметрами ВЗС, позволяет использовать аппарат, адекватный решаемой задаче.

Функциональная связь между активным воздействием на объект  $\boldsymbol{x}_a$  и регулируемой величиной Z:

$$X_a = W(p)Z \tag{1}$$

называется законом управления. В работе [8] показано, что активные элементы улучшают виброзащиту в низкочастотной области. Наиболее существенно в связи с этим изменяются интересующие нас динамические характеристики, определяющие качество виброзащиты, при использовании законов управления, описываемых передаточной функцией не сложнее вида:

$$W(p) = \frac{b_0 + b_1 p}{a_0 + a_1 p},$$
 (2)

где  $b_0$ , $b_1$ , $a_0$ , $a_1$  - постоянные коэффициенты, р — оператор  $\Lambda$ апласа.

Анализ ВЗС при вибрационных и ударных возмущающих воздействиях построен на том, что стационарные движения исследуются на основе амплитудно-частотных характеристик (AЧX), а переходные - с помощью временных h(t).

В соответствии с назначением активных систем в установившихся режимах должно выполняться условие:

$$J_{1}\left(\left|\frac{Z}{Z_{1}}\right| - J_{2}\left|\frac{Z}{Z_{1}}\right|_{a}\right) > 0. \tag{3}$$

Здесь 
$$\left| \frac{Z}{Z_1} \right|_n$$
 и  $\left| \frac{Z}{Z_1} \right|_a$  - коэффициенты

передач (АЧХ) амплитуд движений объекта Z и возмущения  $Z_1$  соответственно для исходной пассивной системы и, полученной при введении связи W(p) -активной;  $J_1, J_2$  - функционалы целесообразности и эффективности AB3C.

При выполнении анализа достаточно ограничиться условней эффективности

$$\frac{\left|\frac{Z}{Z_1}\right|_n - \left|\frac{Z}{Z_1}\right|_a > 0,\tag{4}$$

которое определяет выигрыш от использования дополнительных активных связей с тем или иным законом управления.

Требование устойчивости процессов налагает условия, которые могут быть записаны на основе критерия Гурвица, и совместно с неравенством (4) определять пространство параметров, удовлетворяющих работоспособной AB3C. Исследования показывает, что введе-





ние дополнительных связей вида (2), позволяет подучить выигрыш в коэффициентах передач амплитуд при низких частотах возмущений.

Одновременно наличие активных устройств вызывает значительное изменение динамических характеристик. Показано, что вид закона управления, вязкое трение, величины и соотношения параметров системы влияют на качество AB3C.

Введение дополнительных активных связей в переходных режимах эффективно, если соблюдается условие:

$$J_a < J_n \, , \tag{5}$$

где  $\boldsymbol{J}_a$  и  $\boldsymbol{J}_n$  - интегральные критерии качества переходных процессов.

Для простых законов управления предлагаются выражения для расчета показателей вида

$$J = \int_{0}^{\infty} \xi^{2}(t) dt, \tag{6}$$

где  $\xi$  - относительное отклонение объекта. Доказано, что в определенном диапазоне параметров можно получить выигрыш по критериям качества типа (6). При этом одновременно должны выполняться условия устойчивости.

Автором получены выражения и определены некоторые "непосредственные" показатели переходных функций (величина перерегулирования, время затухания, число колебаний и т.д.) на примере пропорционального закона, которые в некоторых случаях должны использоваться в дополнение к интегральным критериям. Введение обратных активных связей качественно изменяет характер переходных процессов.

**II.** Принципиальные схемы электрогидравлических систем, описание их функционирования, расчетные схемы, структурные модели и передаточные функции представлены в работе[1].

В тех случаях, когда требуется значительное быстродействие и высокая точность передачи сигналов, большое усиление по мощности и достаточная стабильность и чувствительность, используются следящие электрогидравлические объемные приводы. Расчетная схема системы (рис.1) наряду с пассивными элементами содержит гидравлические силовые цилиндры двухстороннего действия. Унифицированная схема ЭГАВЗС, представленная на рис.2, содержит дополнительную ак-

тивную связь (по параметрам состояния объекта защиты) в виде следящего гидропривода.

Как показали исследования, более перспективными являются системы с объемно-дроссельным и дроссельным регулированием, особенно последние.

Дифференциальные уравнения движения гидравлических элементов, составленные с учетом постоянства давления питания золотникового механизма сжимаемой рабочей жидкости показывают, что при введении дополнительных активных устройств в ВЗС, естественным образом, одновременно включаются некоторые паразитные связи, искажающие необходимое преобразование входной информации. В связи с этим представляется необходимым использование в АВЗС устройства формирования закона управления W(p).

В активных системах возможно использование принципов управления по отклонению, которому уделено основное внимание, управления по возмущению и комбинированного варианта.

На рис.3 показана линеаризованная структурная схема расчетной модели AB3C,

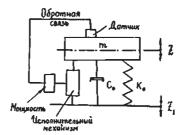


Рис. 1. Обобщенная расчетная схема активной виброзащитной системы.

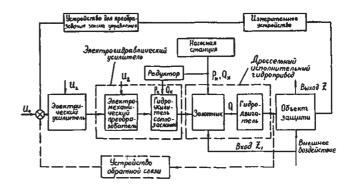


Рис. 2. Структурная схема электрогидравлической виброзащитной системы.





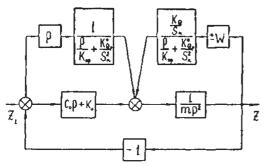


Рис. 3. Структурная схема электрогидравлической виброзащитной системы.

при этом передаточная функция её может быть записана:

$$W_{o \delta u_{l}}(p) = \frac{Z}{Z_{1}} =$$

$$= \frac{p^{2} \frac{C_{0}}{k_{np}} + p \begin{pmatrix} \frac{C_{0} k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \\ + \frac{k_{0}}{k_{np}} + 1 \end{pmatrix} + \frac{k_{0} k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}}}{S_{n}^{2}}$$

$$= \frac{p^{3} \frac{m}{k_{np}} + p^{2} \begin{pmatrix} \frac{m k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \\ + \frac{C_{0}}{k_{np}} \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} \frac{C_{0} k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \\ + \frac{k_{0}}{k_{np}} + 1 \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} \frac{k_{0}}{k_{0p}} + 1 \\ + \frac{k_{0}}{k_{np}} + 1 \end{pmatrix} + \frac{k_{0} k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} \pm \frac{k_{Q}}{S_{n}} W(p).$$

$$(7)$$

В выражении (7) верхний знак (+) соответствует отрицательной обратной связи, а нижний (-) - положительной;

m - масса объекта;

 $c_0$  - коэффициент демпфирования вязкого трения;

$$\frac{1}{k_{np}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{\infty}}$$
 - обратная величина приве-

денному коэффициенту жесткости системы, включающей дополнительные упругие связи между штоком гидроцилиндра и объектом  $K_2$  и корпусом гидроцилиндра и основанием

$$K_{\pi} = \frac{2ES_{n}^{2}}{V} + K_{mp}$$
; Е - объемный модуль упру-

гости жидкости; V - объем рабочей полости гидродвигателя с эффективной площадью  $S_n$ ;  $K_{mp}$  - коэффициент упругости трубопроводов;  $K_Q$  - коэффициент усиления

расхода по перемещении золотника;  $K_{Q_p}^0$  - коэффициент "скольжения" золотника под нагрузкой на шток [9].

Введение обратной связи по положению объекта (рис.3) соответствует появлению двух дополнительных ветвей передачи сигналов. Одна из них, образуемая последовательным соединением апериодического

$$l_1(p) = \frac{1}{\frac{p}{k_{np}} + \frac{k_{Q_p}^0}{S_n^2}}$$
 и дифференцирующего

звеньев,  $l_2(p)$  = pпредставляет пассивные связи, сопутствующие активным, отражая конструктивное выполнение гидропривода. Вторая ветвь формирует управляющее воздействие с помощью звена с передаточной функцией W(p), трансформируемое апериодическим  $l_1(p)$  и пропорциональным

$$l_s(p) = \frac{k_Q}{S_-}$$
 звеньями.

III. Динамические характеристики ЭГАВЗС с дроссельный регулированием в стационарных и переходных процессах при кинематических возмущениях для ряда линейных законов управления могут быть определены из передаточных функций. В работе [2] рассмотрены реакции системы на гармоническое и ступенчатое, типа ударного, возмущающие воздействия; получены условия, -определяющие эффективность и устойчивость ЭГАВЗС при различных комбинациях параметров.

Для пропорционального закона управления АЧХ принимает вид:

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{B_2 \omega^4 + B_3 \omega^2 + B_4}{c_2 \omega^{60} + c_3 \omega^4 + c_4 \omega^2 + c_3}},$$
 (8)

где ω- круговая частота колебаний;

$$\begin{split} \boldsymbol{B}_{2} &= \frac{c_{0}}{k_{np}^{2}}; \boldsymbol{B}_{2} = \left(\frac{c_{0}k_{\mathcal{Q}_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \frac{k_{0}}{k_{np}} + 1\right); \\ \boldsymbol{B}_{4} &= \left(\frac{k_{0}k_{\mathcal{Q}_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}}\right)^{2}; c_{2} = \left(\frac{m}{k_{np}}\right)^{2}; \\ c_{3} &= \left(\frac{mk_{\mathcal{Q}_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \frac{c_{0}}{k_{np}}\right) - 2\frac{m}{k_{np}}\left(\frac{c_{0}k_{\mathcal{Q}_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \frac{k_{0}}{k_{np}} + 1\right); \end{split}$$





$$\begin{split} c_5 = & \left( \frac{k_0 k_{Q_p}^0}{S_n^2} \pm \frac{b_0 k_Q}{a_0 S_n} \right)^2; \\ c_4 = & -2 \left( \frac{m k_{Q_p}^0}{S_n^2} + \frac{c_0}{k_{np}} \right) \frac{k_0 k_{Q_p}^0}{S_n^2} \mp \\ \mp & 2 \left( \frac{m k_{Q_p}^0}{S_n^2} + \frac{c_0}{k_{np}} \right) \frac{b_0 k_Q}{a_0 S_n} + \left( \frac{c_0 k_{Q_p}^0}{S_n^2} + \frac{k_0}{k_{np}} + 1 \right)^2. \end{split}$$

Исследование экстремальных свойств АЧХ сводится к анализу количества и распределения положительных вещественных корней уравнения

$$\frac{d[A(\omega)]}{d\omega} = 0. (9)$$

Дифференцируя (8) и отбрасывая по причине физической неосуществимости корень  $\omega$  = 0, уравнение (9) экстремальных частот можно записать:

$$-C_{2}B_{2}\omega^{2} - 2C_{2}B_{3}\omega^{6} -$$

$$-(C_{3}B_{3} - B_{2}C_{4} + 3C_{2}B_{4})\omega^{4} +$$

$$+(2C_{3}B_{2} - 2C_{3}B_{4})\omega^{2} +$$

$$+C_{5}B_{3} - C_{4}B_{4} = 0$$
(10)

решение которого в зависимости от величин и соотношений параметров соответствует наличию в АЧХ ВЗС одного, двух или трех экстремальных значений.

Условие эффективности (4) для отрицательной обратной связи имеет вид:

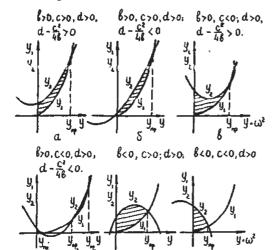


Рис. 4. Графики сравнительной эффективности виброзащиты при различных параметрах закона управления.

$$-y^{3}a\pm y^{2}b\pm yc+d>0,$$
 (11)

здесь  $y = \omega^2$ ;

$$a = m + \frac{2m^{2}k_{0}}{k_{np}} + \frac{2m^{2}c_{0}k_{Qp}^{0}}{S_{n}^{2}} + \frac{2mc_{0}}{k_{np}};$$

$$b = 2k_{0}m + \frac{2mk_{0}^{2}}{k_{np}} + \frac{4k_{0}c_{0}mk_{Qp}^{0}}{S_{n}^{2}} - \frac{2c_{0}^{2}mb_{0}k_{Q}k_{Qp}^{0}}{S_{n}^{3}a_{0}};$$

$$c = \frac{c_{0}^{2}b_{0}^{2}k_{Q}^{2}}{a_{0}^{2}S_{n}^{2}} + \frac{2c_{0}^{2}mb_{0}k_{Q}k_{Qp}^{0}}{a_{0}S_{n}^{3}a_{0}};$$

$$d = \frac{k_{0}^{2}b_{0}^{2}k_{Q}^{2}}{a_{0}^{2}S_{n}^{2}} + \frac{2k_{0}^{2}c_{0}b_{0}k_{Q}}{a_{0}S_{n}k_{np}} - \frac{2k_{0}^{3}mbk_{Q}k_{Qp}^{0}}{a_{0}S_{n}^{3}};$$

$$d = \frac{k_{0}^{2}b_{0}^{2}k_{Q}^{2}}{a_{0}^{2}S_{n}^{2}} + \frac{2k_{0}^{3}b_{0}k_{Q}k_{Qp}^{0}}{a_{0}S_{n}^{3}}.$$

Двойной знак перед слагавший в неравенстве (11) обозначает возможность изменения знака коэффициентов b и с в зависимости от выбранных параметров системы.

На рис. 4 заштрихованы области, в которых условия (11) выполнимы, что свидетельствует об эффективности введения пропорционального закона управления в отрицательной обратной связи по отклонению объекта.

Одновременно должно выполняться условие устойчивости, записываемое в работе на основе критерия Гурвица в виде следующего неравенства:

$$\frac{k_{\mathcal{Q}}b_{0}}{S_{n}a_{0}} \leq \frac{c_{0}k_{np}\left(k_{\mathcal{Q}_{p}}^{0}\right)^{2}}{S_{n}^{4}} + \frac{c_{0}^{2}k_{\mathcal{Q}_{p}}^{0}}{mS_{n}^{2}} + \frac{k_{np}k_{\mathcal{Q}_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \frac{c_{0}}{m} + \frac{c_{0}k_{0}}{mk_{np}}.$$
(12)

Используя понятие о предельном коэффициенте усиления (12)

 $k_{\mathrm{max}} = \frac{k_{\scriptscriptstyle Q} b_{\scriptscriptstyle 0}}{S_{\scriptscriptstyle D} a_{\scriptscriptstyle 0}}$ ,из необходимого условия устойчи-

вости

$$\frac{k_{Q}b_{0}}{S_{n}a_{0}} = \alpha \frac{k_{0}k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}}$$
 (13)





введем коэффициент  $\alpha$  (0<  $\alpha$  ≤1) в условие эффективности (11), полагая для простоты  $c_0$  =0:

$$-\omega^{6} m^{2} \left(1 + \frac{2k_{0}}{k_{np}}\right) + \omega^{4} 2k_{0} m \left(1 + \frac{k_{0}}{k_{np}}\right) +$$

$$+\alpha \frac{k_{0}^{3} \left(k_{Q_{p}}^{0}\right)^{2}}{S_{n}^{4}} \left(2k_{0} k_{np} - 2m k_{np} \omega^{2} + \alpha k_{np}^{2}\right) > 0.$$
(14)

Пренебрегая в области низких частот возмущений, в виду малости, членами высокого порядка, убедимся, что неравенство (14) сводится к условии  $\alpha+2>0$ , подтверждающее работоспособность AB3C.

Переходная функция h(t) определяет реакции системы на единичные ступенчатые возмущающие воздействия типа ударных. Для рассматриваемого закона управления на основе передаточной функции (7) можно записать:

$$h(t) = R_1 + R_2 e^{-\delta t} + e^{-\frac{\beta}{2}t} (R_3 \cos \omega t + \frac{R_4 - R_3 \frac{\beta}{2}}{\omega} \sin \omega t),$$
 (15)

если

$$\gamma > \beta_{4}^{2}, \omega = \sqrt{\gamma - \frac{\beta^{2}}{4}};$$

$$h(t) = R_{1} + R_{2}e^{-\delta t} +$$

$$+ \frac{1}{2} \left[ (R_{3} + R_{6})e^{\left(\omega_{1} - \frac{\beta}{2}\right)t} + + \left(R_{3} - R_{6}\right)e^{-\left(\omega_{1} + \frac{\beta}{2}\right)t} \right];$$
(16)

если  $\gamma < \beta_4^2$ ,  $\omega_1 = \sqrt{\frac{\beta^2}{4} - \gamma}$ ; где  $\delta$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  - коэффициен-

ты разложения знаменателя функции (7) на простые сомножители;

$$\begin{cases} R_{1} = \frac{\frac{k_{0}k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}}}{\frac{k_{0}k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \frac{k_{Q}b_{0}}{S_{n}a_{0}}}, \\ R_{2} = \frac{\left(\frac{c_{0}k_{Q_{p}}^{0}}{S_{n}^{2}} + \frac{k_{0}}{k_{np}} + 1\right)\frac{k_{np}}{m} - \frac{c_{0}\delta}{m} - R_{1}\gamma}{\delta^{2} - \delta\beta + \gamma}, \quad (17) \\ R_{1} + R_{2} + R_{3} = 0, R_{4} = \frac{c_{0}}{m} - \beta P_{1} + (\delta - \beta)R_{2} \\ R_{6} = \frac{R_{4} - R_{3}\frac{\beta}{2}}{\omega_{1}}. \end{cases}$$

Выражения (15), (16) позволяют находить «непосредственные» показатели качества h(t) и влияние величин параметров на переходные процессы.

Аналогично исследовано поведение ЭГАВЗС при интегральном, апериодическом дифференцирующем и законе управления общего вида (2).

В приложении приведены АЧХ и h(t), рассчитанные для работоспособных AB3C при различных сочетаниях их параметров.

Определение границ допустимых соотношений параметров для выполнения условий устойчивости может быть осуществлено с помощью метода D — разбиения. Получены, в частности, диаграммы D — разбиения на плоскости коэффициентов: изменения расхода и давления по смещению золотника; усиления  $k = \frac{b_0}{a_0}$  и постоянной времени  $T = \frac{a_1}{a_0}$  для закона

управления общего вида; предельного коэффициента усиления  $k_{\rm max}$  и приведенной жесткости  $k_{\rm np}$  для пропорционального и интегрального законов. Накопленные результаты о свойствах и характеристиках ГАВЗС позволяют в зависимости от поставленных задач выбрать необходимый закон управления системой.

IV. Особенности динамики электрогидравлических виброзащитных систем вызваны влиянием утечек рабочей жидкости, наличием вязкого трения, влиянием возмущений на золотниковый управляющий механизм, учетом нелинейностей и реальных свойств элементов, а также включением дополнительных устройств, обеспечивающих высокое качество и стабильность функционирования активных связей.

Наличие утечек и перетачек жидкости увеличивает требуемый расход жидкости. Вместе с тем утечки, а также вязкое трение используют для стабилизации систем. Как показали расчеты, возрастание потерь расхода жидкости уменьшает коэффициент передачи амплитуд колебаний на резонансных частотах, не влияя практически на форму АЧХ в других её областях. Одновременно возрастает "скольжение" гидродвигателя под нагрузкой. Увеличение коэффициента демпфирования  $c_0$  приводит к ограничению резонансных амплитуд и повышению коэффициентов динамичности в зонах, прилегающих к собственным частотам.





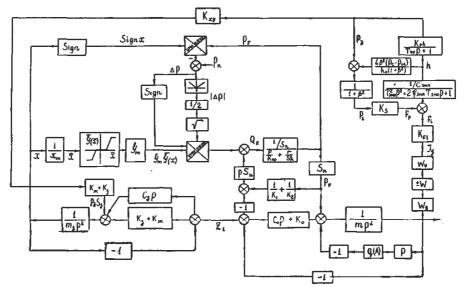


Рис. 5. Детализированная структурная схема виброзащитной системы.

При проектировании ЭГАВЗС немаловажное значение имеет способ закрепления золотникового механизма. В некоторых случаях возмущающие нагрузки передаются на управляющие органы, изменяя характеристики системы. В работе приведена структурная схема и получена передаточная функция системы, позволяющие учесть динамику золотника для электрогидравлических усилителей, используемых в настоящее время в гидроприводах, и наличие дополнительных виброизолирующих каскадов  $K_1$  и  $K_2$ .

С помощью методов гармонической линеаризации могут быть оценены влияние нелинейностей типа сухое трение объекта, насыщение перепада давления и расхода жидкости в исполнительном гидромеханизме.

Полный анализ свойств ЭГАВЗС следует проводить при полном наборе элементов (см. схему на рис.2) и реальных характеристиках датчиков, электрических усилителей, гидравлического усилителя сопло-заслонка (ГУ), электромеханического преобразователя (ЭШ).

На рис.5 представлена структурная схема, позволяющая провести расчеты динамики ЭГАВЗС с учетом всех ее особенностей, присущих рассматриваемой модели системы.

Использованы следующие обозначения:

 $W_{g}$  ,  $W_{y}$  - передаточные функции датчика и усилителей;

 $\it r$  - объемный коэффициент потерь расхода;

 $m_g$  ,  $k_g$  ,  $c_g$  - масса золотника, жесткость его пружин и коэффициент их вязкого трения;

$$q(A) = \frac{4F_{mp}}{\pi pz}$$
 - гармонический коэффици-

ент усиления сухого трения  $F_{mp}$ ;

$$\overline{y} = \frac{y}{y_m}$$
,  $\overline{x} = \frac{x}{x_m}$ ;  $y_m u x_m$  - максимальные ве-

личины гидравлической проводимости рабочих окон из-за перепада давления и перемещения золотника;

 $p_{_{n}}=p_{_{u}}-p_{_{C\!A}}$  - давления питания гидродвигателя;

 $p_{\scriptscriptstyle F} = p_{\scriptscriptstyle 1} - p_{\scriptscriptstyle 2}\;$  - перепад давлений на поршне цилиндра;

 $\boldsymbol{J}_{_{\boldsymbol{v}}}$  - управляющая ЭМП сила тока;

 $k_{\mathit{Fi}}$  - коэффициент усиления силы на якоре ЭМП по  $J_{v}$  .

 $T_{\rm ЭМП}$  ,  $C_{\rm ЭМП}$  ,  $\xi_{\rm ЭМП}$  - постоянная времени, коэффициенты жесткости и относительного демпфирования ЭМП;

h - перемещение якоря ЭМП;

 $k_{\it ph}$  - крутизна силовой характеристики гидромостика;

 $\mathbf{T}_{\mathit{\Gamma \! Y}}$  - постоянная времени  $\ \Gamma \! \mathbf{Y}$ , питаемого давлением  $p_{k}$  ;

 ${\rm K}_{{\it xp}}$  - коэффициент перемещения золотника по давлению  $p_\partial$  в диагонали гидромостика:

 $p_S$  - разность давлений, воздействующая на заслонку ГУ с конструктивными коэффициентами $h_0$ ,  $\beta$ ,  $k_\delta$ ;

 $p_{c}$  давление перед соплом ГУ;





 $F_{i} \ u \ F_{p} \$  - силы от электромагнитных и гидродинамических нагрузок на якорь.

Результаты экспериментальных исследований ЭГАВЗС в режиме вынужденных и ударных возмущений для пропорционального закона управления, проведенных на специальной установке, соответствующей расчетной модели (рис.1), позволили определить область рабочих параметров, в которых опытные зависимости достаточно точно соответствуют теоретическим, линеаризованным, рассчитанным на основе выражения (8).

Использование пропорционального закона управления, как и предполагалось, позволяет получить выигрыш в коэффициентах передач амплитуд, при этом эффективность AB3C возрастает при увеличении коэффициентов усиления обратной связи.

Анализ осциллограмм показывает, что введение дополнительной активной связи, существенно изменяет реакции системы, подтверждая достоверность исследований. проведенных в работе [10].

Таким образом, автором предложен метод динамического синтеза виброзащитных систем, обеспечивающий их эффективность и устойчивость работы в заданном частотном диапазоне. Разработана методика оценки поведения в установившихся и переходных режимах механической системы с идеальной обратной связью по основным параметрам движения объекта защиты и получены условия соотношения, определявшие эффективность и устойчивость активных виброзащитных систем в рабочем диапазоне величин возмущающих воздействий и найдены их предельные границы, а также определены характеристики активной системы с дроссельным регулированием в стационарных и переходных режимах при кинематических возмущениях и выполнена оценка эффективности электрогидравлических обратных связей для ряда линейных законов управления с учетом особенностей динамики системы, связанных с наличием утечек жидкости, вязкого трения, нелинейностей типа «сухое трение», насыщение, расхода и давления питания исполнительного устройства активных связей; рассмотрены вопросы определения влияния свойств золотникового механизма на характеристики системы в связи с передачей возмущающих нагрузок на управляющий органы и включением дополнительных каскадов.

### ВИБЛИОГРАФИЯ

- 1. Засядко А.А. Динамика электрогидравлических виброзащитных систем. Автореферат канд. дисс. НЭТИ. Новосибирск. 1973. 24 с.
- 2. Засядко А.А. Технология автоматизированного проектирования, исследования и расчета виброзащитных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. Вып. 3. Иркутск. 2004. С. 20-26.
- 3. Елисеев С.В., Засядко А.А., Лонцих П.А. и др. Теория активных виброзащитных систем. ИПИ. Иркутск. 1974. -240 с.
- 4. Елисеев С.В., Засядко А.А., Корпухин Е.Л. и др. ППП системы автоматизированного проектирования виброзащитных систем (ВИЗА) // Бюлл. «алгоритмы и программы» №1. Москва. 1987. С. 72-84.
- 5. Засядко А.А., Упырь Р.Ю., Логунов А.С. некоторые подходы к задачам динамического синтеза механических колебательных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС № (13). Иркутск. 2007. С. 27-37.
- 6. Засядко А.А., Логунов А.С., Пермяков М.А. Динамические в дуальных механических цепях // Материалы международной конференции «Инновационные технологии транспорту и промышленности». ДВГУПС. г. Хабаровск. 2007. С. 83-86.
- 7. Засядко А.А., Упырь Р.Ю., Московских А.О. Особенности учета силовых возмущений в структурных представлениях механических систем // Материалы XI Международной конференции «Решетневские чтения». Красноярск. 2007. С. 142-148.
- 8. Засядко А.А., Упырь Р.Ю. Возможные представления последовательных и параллельных соединений в структурных интерпретациях механических колебательных систем // Материалы XI Международной конференции «Решетневские чтения». Красноярск. 2007. С. 176-180.
- 9. Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Лукьянов А.В. Упругие колебания роботов // Наука. Новосибирск. 1992. 287 с.





Быкова Н.М., Каргапольцев С.К., Пыхалов А.А., Милов А.Е. УДК 693.546.4

# НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ КОНЕЧНО - ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТОННЕЛЕЙ В СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ГОРНЫХ МАССИВАХ

СНиП 32-04-97 «Тоннели железнодорожные и автодорожные» [1] регламентирует необходимость соответствия расчетных моделей тоннельных обделок условиям работы сооружений, технологии их возведения, характеру взаимодействия элементов конструкций между собой и окружающим грунтом с учетом неблагоприятных сочетаний нагрузок и воздействий во время строительства и эксплуатации сооружения. Качество и надежность проектных решений при этом зависят от степени приближения построения расчетной модели к реальным условиям работы конструкций.

Работа подземного сооружения во время эксплуатации во многом определяется правильностью учета при проектировании внешних воздействий, статики и динамики взаимодействия конструкций, использования приближенных к реальным физических моделей работы материалов. В сухих однородных скальных грунтах транспортные тоннели могут нормально эксплуатироваться сотни лет. Совсем иная картина наблюдается в тоннелях, построенных в условиях изменения горного, гидростатического давления, температурных, сейсмических и геодеформационных воздействий. Под геодеформационными воздействиями понимаются смещения горных блоков по разломам. Сами по себе изменения внешних условий дополнительно влекут изменения физического состояния, как грунтов, окружающих тоннель, так и бетонов обделки.

Для обеспечения безопасности и долговечности эксплуатации транспортных тоннелей, развития эффективных методов содержания и ремонта конструкций подземных сооружений необходимо иметь достоверную оценку их работы и состояния. Контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) подземных сооружений, прогнозирование их

поведения в зависимости от изменения каких-либо условий можно осуществлять с помощью виртуальной физико - математической модели, как глобальной, так и фрагментарной. Глобальная модель охватывает работу объекта в целом и может быть выполнена без детализации отдельных конструкций. Из глобальной модели вырезаются любые сложные участки с заданием граничных условий с целью анализа НДС более детальных конструктивных моделей, например, совместной работы конструкций обделки и верхнего строения пути. Математическое моделирование должно сопровождаться натурными методами сбора информации.

На первом этапе поставлена цель построения и анализа глобальной физико-математической конечно-элементной модели. В качестве объекта был выбран Северо-Муйский железнодорожный тоннель, отличающийся уникальностью своей работы в геодинамически-активном районе Байкальской рифтовой зоны

Для достижения цели в работе решалось две задачи. Первая из них состояла в получении основных зависимостей МКЭ и построение конечно-элементной (КЭ) глобальной модели рассматриваемого объекта, куда входят: ее геометрические характеристики; процедура дискретизации на конечные элементы; применяемые материалы и их свойства; граничные условия выделения симметричной части тоннеля и сегмента земной коры; величины и особенности используемых типов силового воздействия. Моделирование горного массива осуществляется относительно данных геодезических съемок инженерно-геологических разрезов.

Вторая задача состояла в проведении анализа полученной КЭ модели тоннеля, пути и





горного массива, состоявшего из решения ряда физических задач, в качестве которых приведены расчеты напряженно - деформированного состояния (НДС) при воздействии гравитационной нагрузки; определение температурного поля в условиях стационарной теплопроводности, для максимальных условий зимнего периода эксплуатации; НДС при воздействии полученного поля температур.

Результатом представленных типов анализа является оценка НДС конструкции, представляющую собой полную протяженность обделки тоннеля пути и горного массива.

Основные зависимости МКЭ [2] построены для объемного НДС, с использованием конечного элемента в виде изопараметрического гексаэдра первого порядка аппроксимации, с дополнительным подключением алгоритма несвязных функций формы [3]. Необходимость этого алгоритма обусловлена повышением уровня точности решения, получаемого без увеличения размерности глобальной системы алгебраических уравнений, что является решающим фактором для анализа сложных объектов моделирования.

Однако сама процедура решения задачи может оказаться эффективнее, если интерполировать перемещения полиномами более высокой степени, чем координаты. Удобным способом улучшения изопараметрического элемента является введение несовместных функций формы.

В этом случае поле перемещений деформируемой системы представляется в виде:

$$u = \left\{\overline{N}\right\}^T \begin{cases} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_{11} \end{cases}; v = \left\{\overline{N}\right\}^T \begin{cases} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_{11} \end{cases}; w = \left\{\overline{N}\right\}^T \begin{cases} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_{11} \end{cases}, \quad (1) \qquad \left[\overline{K}\right]^{(e)} = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ m=1}}^8 \left[\overline{B}\left(\xi_i, \eta_j, \zeta_m, r_{ijm}\right)\right]^T \left[D\left(T_{ijm}\right)\right] \times \left[\frac{1}{M}\right]^T \left[$$

где:  $\mathbf{u_{_1}} - \mathbf{u_{_8}}$ ,  $\mathbf{v_{_1}} - \mathbf{v_{_8}}$  ,  $\mathbf{w_{_1}}$  -  $\mathbf{w_{_8}}$  - перемещения, связанные с 8 узлами конечного элемента сетки;  ${
m u_{_9}-u_{_{11}}}$ ,  ${
m v_{_9}}$  -  ${
m v_{_{11}}}$ ,  ${
m w_{_9}}$  -  ${
m w_{_{11}}}$  -дополнительные степени свободы, определяющие более высокую степень интерполяции перемещений.

Вектор-столбец функций формы в этом случае имеет вид:

$$\left\{\overline{N}\right\}^{T} = \left\{N_{1} \quad N_{2} \quad \dots \quad N_{11}\right\},\tag{2}$$

где:  $N_{_{9'}}$   $N_{_{10'}}$   $N_{_{11}}$  - несовместные функции формы, задаваемые в виде:

$$N_9 = 1 - \xi^2$$
;  $N_{10} = 1 - \eta^2$ ;  $N_{11} = 1 - \varsigma^2$ . (3)

Использование несовместных функций формы при составлении матрицы жесткости конечного элемента позволяет уменьшить завышенные деформации сдвига, возникающие при моделировании изгиба толстых пластин и оболочек объемными изопараметрическими конечными элементами. В рассматриваемом объекте моделирования к ним можно отнести обделки тоннеля и другие конструктивные элементы. Явление завышения деформации сдвига возникает из-за неспособности узловых функций форм конечного элемента отразить деформированное состояние, вызванное изгибающим воздействием в моделируемом объекте.

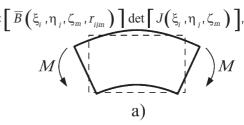
На рис. 1а показаны деформации бесконечно малого объема, вырезанного, например, из обделки тоннеля, в сравнении с деформациями конечного элемента, того же объема (рис. 1б), находящихся под действием одного и того же изгибающего момента. Из анализа рисунков видно, что конечный элемент с линейной аппроксимацией не способен отразить деформации изгиба и заменяет их деформациями сдвига. Завышением деформаций сдвига "отбирается" часть энергии деформации, что приводит, в частности, к равновесию работ деформирования твердых тел при меньших величинах перемещений узлов.

Тем самым КЭ модель ужесточается по сравнению с реальной конструкцией.

Выражение для вычисления матрицы жесткости конечного элемента [2], с использованием несовместных функций формы [3] заванием посодиписывается в виде:  $\left[\overline{K}\right]^{(e)} = \int\limits_{V^{(e)}} \left[\overline{B}\right]^T \left[D\right] \left[\overline{B}\right] dV.$ 

$$\left[\overline{K}\right]^{(e)} = \int_{V^{(e)}} \left[\overline{B}\right]^{T} \left[D\right] \left[\overline{B}\right] dV. \tag{4}$$

$$\left[\overline{K}\right]^{(e)} = \sum_{\substack{i=1\\j=1\\m=1}}^{8} \left[\overline{B}\left(\xi_{i}, \eta_{j}, \zeta_{m}, r_{ijm}\right)\right]^{T} \left[D\left(T_{ijm}\right)\right] \times \tag{5}$$



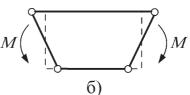


Рис. 1. Явление завышения деформаций сдвига при моделировании изгиба толстых пластин.





где:  $T_{\it ijm}$  - значение температуры в текущей точке интегрирования:

$$T_{ijm} = \left\{ N\left(\xi_{i}, \eta_{j}, \varsigma_{m}\right) \right\}^{T} \begin{cases} T_{1} \\ T_{2} \\ \dots \\ T_{8} \end{cases}. \tag{6}$$

Выражение для матрицы дифференцирования, с использованием несовместных функций формы, приобретает вид:

$$\begin{bmatrix} \overline{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & \dots & B_{11} \end{bmatrix}.$$
(7)

Для вычисления производных от несовместных функций формы  $N_{9}$ ,  $N_{10}$ ,  $N_{11}$  по глобальным координатам x, y, z используется прием аналогичный узловым составляющим, где имеем:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_{9}}{\partial r} & \frac{\partial N_{10}}{\partial r} & \frac{\partial N_{11}}{\partial r} \\ \frac{\partial N_{9}}{\partial \theta} & \frac{\partial N_{10}}{\partial \theta} & \frac{\partial N_{11}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial N_{9}}{\partial z} & \frac{\partial N_{10}}{\partial z} & \frac{\partial N_{11}}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -2\xi & 0 & 0 \\ 0 & -2\eta & 0 \\ 0 & 0 & -2\varsigma \end{bmatrix}.$$
(8)

Рассматривая матрицу жесткости элемента, необходимо заметить, что использование выражения (4) приводит к матрице  $\lceil \overline{K} \rceil^{(e)}$ 

33-го порядка, а степени свободы  $u_{g\prime}u_{10\prime}...w_{11}$  не связаны с узлами конечного элемента. Для снижения размерности матрицы до 24-х, дополнительные степени свободы исключаются путем статической конденсации, которая эквивалентна минимизации полной потенциальной энергии конечного элемента, как деформируемой системы, относительно несвязных перемещений  $u_{g\prime}u_{10\prime}...w_{11}$ . Рассмотрим уравнение равновесия:

$$\left[\overline{K}\right]^{(e)} \begin{Bmatrix} \left\{\delta\right\}^{(e)} \\ \overline{\delta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left\{F\right\}^{(e)} \\ 0 \end{Bmatrix}, \tag{9}$$

где  $\left\{\delta\right\}^{(e)}$  - содержит узловые значения перемещений,  $\overline{\delta}$  - содержит переменные, не связанные с узлами КЭ,

$$\left[\overline{K}\right]^{(e)} = \left[\overline{K}\widehat{K}\widehat{K}^T\overline{\overline{K}}\right]. \tag{10}$$

Из второй строки в выражении (9) находим

$$\overline{\delta} = -\overline{\overline{K}}^{-1} \widehat{K}^T \left\{ \delta \right\}^{(e)}. \tag{11}$$

После подстановки этого выражения в первую строку выражения (7), получаем известное соотношение:

$$[K]^{(e)} \{\delta\}^{(e)} = \{F\}^{(e)},$$
 (12)

где  $[K]^{(e)}$  - редуцированная матрица жесткости конечного элемента порядка 24, определяемая выражением вида:

$$\left[K\right]^{(e)} = \overline{K} - \widehat{K}\overline{\overline{K}}^{-1}\widehat{K}^{T}. \tag{13}$$

Нередуцированная матрица жесткости элемента может быть записана в виде

$$\left[\overline{K}\right]^{(e)} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{111} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{211} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{111} & K_{112} & \dots & K_{1111} \end{bmatrix}, \tag{14}$$

где каждая из подматриц имеет размерность [3x3] и строится следующим образом

$$K_{rs} = \sum_{\substack{i=1\\j=1\\m=1}}^{8} \begin{bmatrix} k_{11}^{rs} & k_{12}^{rs} & k_{13}^{rs} \\ k_{21}^{rs} & k_{22}^{rs} & k_{23}^{rs} \\ k_{31}^{rs} & k_{32}^{rs} & k_{33}^{rs} \end{bmatrix} \det \left[ J(\xi_{i}, \eta_{j}, \zeta_{m}) \right], (15)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11}^{rs} & k_{12}^{rs} & k_{13}^{rs} \\ k_{21}^{rs} & k_{22}^{rs} & k_{23}^{rs} \\ k_{31}^{rs} & k_{32}^{rs} & k_{33}^{rs} \end{bmatrix} =$$

$$(16)$$

$$= \left[ B_r \left( \xi_i, \eta_j, \zeta_m \right)^T \left[ D \left( T_{ijm} \right) \right] B_s \left( \xi_i, \eta_j, \zeta_m \right) \right].$$

После подстановки в выражение (13) матрицы дифференцирования, содержащей производные от узловых и несовместных функций формы, а также выражения для матрицы упругости объемного НДС, элементы подматрицы  $K_{rs}$  записываются в явном виде:

$$k_{11}^{rs} = \left(B_{1}^{r}B_{1}^{s} + B_{2}^{r}B_{2}^{s}\right)D_{1} + \left(B_{1}^{r}B_{2}^{s} + B_{1}^{s}B_{2}^{r}\right)D_{2} + \left(B_{3}^{r}B_{3}^{s} + B_{4}^{r}B_{4}^{s}\right)D_{3};$$

$$k_{12}^{rs} = \left(B_{1}^{r}D_{2} + B_{2}^{r}D_{1}\right)B_{3}^{s} + B_{3}^{r}B_{5}^{s}D_{3};$$

$$k_{13}^{rs} = \left(B_{1}^{r} + B_{2}^{r}\right)B_{4}^{s}D_{2} + B_{1}^{s}B_{4}^{r}D_{3};$$

$$k_{21}^{rs} = \left(B_{1}^{s}D_{2} + B_{2}^{s}D_{1}\right)B_{3}^{s} + B_{3}^{s}B_{5}^{r}D_{3};$$

$$k_{22}^{rs} = \left(B_{4}^{r}B_{4}^{s} + B_{5}^{r}B_{5}^{s}\right)D_{3} + B_{3}^{r}B_{3}^{s}D_{1};$$

$$k_{23}^{rs} = B_{3}^{r}B_{4}^{s}D_{2} + B_{3}^{s}B_{4}^{r}D_{3};$$

$$k_{31}^{rs} = \left(B_{1}^{s} + B_{2}^{s}\right)B_{4}^{r}D_{2} + B_{1}^{r}B_{4}^{s}D_{3};$$

$$k_{32}^{rs} = B_{3}^{s}B_{4}^{r}D_{2} + B_{3}^{r}B_{3}^{s}D_{3};$$

$$k_{33}^{rs} = \left(B_{1}^{r}B_{1}^{s} + B_{3}^{r}B_{3}^{s}\right)D_{3} + B_{4}^{r}B_{4}^{s}D_{1}.$$

$$(17)$$

Поскольку матрица жесткости конечного элемента  $[K]^{(e)}$  симметрична, естественно, что работать и хранить ее в памяти вычислитель-





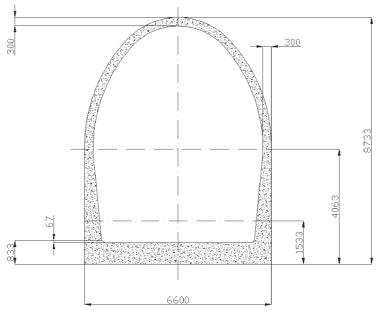


Рис. 2. Поперечное сечение тоннеля.

ной машины выгодно в виде ее верхней (нижней) части матрицы, включая главную диагональ.

Таким образом, столбцы верхнего треугольника матрицы с диагональными элементами можно последовательно поместить в вектор-столбец  $\left\{K\right\}^{(e)}$ 

$$\left\{K\right\}^{(e)} = \left\{ \begin{matrix} K_1 & K_3 & K_6 & K_{10} & \dots & K_{300} \\ & K_2 & K_5 & K_9 & \dots & \dots \\ & & K_4 & K_8 & \dots & \dots \\ & & & K_7 & \dots & \dots \\ & & & & \dots & \dots \\ & & & & K_{277} \end{matrix} \right\}. (18)$$

Для доступа к i-му, j-му элементу используется следующая FORTRAN конструкция:

Value =  $\text{Ke}(j^*(j+1)/2+1-i)$ , где: Value - i-ый, j-ый элемент матрицы  $[K]^{(e)}$ .

Характеристика тоннеля и пути.

Анализируемый тоннель, а также железнодорожный путь и горный массив являются протяженным объектом. Геометрическая характеристика поперечного сечения обделки тоннеля, используемого для моделирования, представлена на рис. 2. Обделка тоннеля, пути и горного массива моделируются в полную длину 15,3 км, с чередованием по длине горных блоков различной направленности, заполненных дробленным перетертым до песчанно-глинистого состояния грунтом №1 и крепкими гранитами — грунт №2, 3. Модель допускает задание каждому блоку своих физико - мехимических характеристик.

Исходная информация, необходимая для моделирования геометрических характеристики горного массива, а также расположение



Рис. 3. - Общий вид геометрии тоннеля, пути и горного массива.



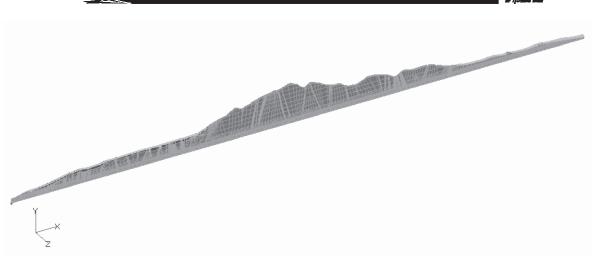


Рис. 4. Общий вид конечно-элементной (КЭ) модели горного массива, обделки тоннеля и пути.

в нем слоев грунта, представлена на рис. 3 и построена в системе AutoCAD.

Для выявления общих закономерностей изменения НДС тоннельной обделки используется упругая модель Мизеса - Губера. Применение представленной модели допустимо, поскольку рассматриваемые конструкции обделки тоннеля и пути преимущественно находятся в условиях сжатия. Напряженно-деформированное состояние в горном массиве используется, в данном случае, в качестве гравитационной нагрузки на представленные конструкции.

Разбиение геометрической модели тоннеля и горного массива на конечные элементы осуществлялось с необходимым сгущением конечно-элементной (КЭ) сетки наиболее на-

Рис. 5. Фрагмент модели с плавным переходом от КЭ сетки обделки тоннеля к КЭ сетке горного массива.

груженных мест деформируемого объекта. Общий вид КЭ модели горного массива, обделки тоннеля и пути представлен на рис. 4.

Дискретизация горного массива в КЭ модели была выполнена более крупными конечными элементами. Сетка конечных элементов подстраивалась под форму и размеры слоев грунта, которые в модели (рис. 4, 5) представлены цветом, соответствующим их свойствам. Для моделирования связи между КЭ сеткой горного массива и КЭ сеткой обделки тоннеля используется плавный переход, выверенный относительно градиента изменения поля напряжений.

Дискретизация обделки тоннеля, а также, области, непосредственно прилегающие к ней, имеют максимальную плотность разбиения. По длине обделки тоннеля в сетке используется один конечный элемент на три погонных метра длины тоннеля. Другие размеры конечных элементов выдержаны относительно требований МКЭ по пропорции их сторон и углов между ребрами. Основной подбор необходимого сгущения КЭ сетки проводился в области обделки тоннеля, его сопряжения с путевым бетоном и рельсом. На рис. 6 представлено моделируемое сечение и сопряжение путевого бетона и рельса.

Дискретизация рельс осуществляется с применением балочных конечных элементов. Соединение балочных КЭ с узлами КЭ сетки путевого бетона осуществлялось посредством конечных элементов типа жесткая вставка. Соединение осуществляется между центром масс сечения балочного КЭ и узлом КЭ сетки





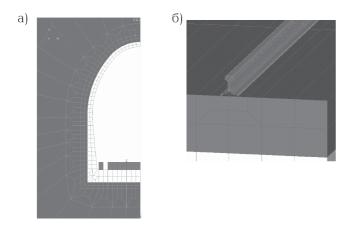


Рис. 6. - Фрагменты сечения тоннеля.

путевого бетона. Моделирование шпал в представленной КЭ сетке проводится с учетом усреднения свойств путевого бетона и бетона шпал, моделируемых с применением конечных элементов объемного напряженно-деформируемого состояния. Позднее, при КЭ моделировании отдельных участков с решением задач анализа НДС верхнего строения пути, планируется большая конструктивная детализация, чем в глобальной модели.

Всего в КЭ модели представленной конструкции горного массива, обделки тоннеля и пути использовано более 2 000 000 узлов КЭ сетки.

Граничными условиями выделяются в плоскостях симметрии степени свободы с взаимным нулевым перемещением на гранях симметричных частей конструкции горного массива, обделки тоннеля и пути. Это - защемление нормальных степеней свободы в горизонтальном направлении оси Z -поперек тоннеля, по оси X - вдоль тоннеля и вертикальном направлении по оси Y - нижней плоскости горного массива. Представленные типы граничных условий используется для всех узлов КЭ сетки рассматриваемой модели.

Свойства материалов в модели для первого приближения приняты изотропными. Значения свойств материалов пересчитаны в соответствии с заданными геометрическими единицами модели в миллиметрах.

Рельсы приняты марки P-65 со следующими свойствами: Модуль Юнга  $E=210000\,\mathrm{M}\Pi$ а,

плотность  $\rho = 7.8^{\star}10^{.9}$  т/мм³, коэффициент Пуассона  $\eta = 0.3$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 12^{\star}10^{3}$  Вт/мм $^{\star}$ К°, коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha = 30^{\star}10^{.6}$ 1/С°.

Материал бетона обделки - В30, со следующими свойствами: модуль Юнга  $E=0.324^{\star}10^{5}$  МПа, плотность  $\rho=2.5^{\star}10^{9}$  т/мм³, Коэффициент Пуассона  $\eta=0.2$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda=1.5^{\star}10^{3}$  Вт/мм $^{\star}$ К $^{\circ}$ , коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha=12^{\star}10^{-6}$  1/С $^{\circ}$ .

Материал путевого бетона В15 со следующими свойствами: Модуль Юнга  $E=0.27^{\star}10^{5}$  МПа, плотность  $\rho=2.5^{\star}10^{-9}$  т/мм³, Коэффициент Пуассона  $\eta=0.2$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda=1.5^{\star}10^{3}$  Вт/мм $^{\star}$ К°, коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha=12^{\star}10^{-6}$  1/С°.

Материалы горного массива были условно разделены на три группы согласно коэффициенту крепости.

Материал "крепкого" скального грунта (синий цвет на рис. 4, 5) со свойствами: Модуль Юнга  $E=0.46^*10^5$  МПа, плотность  $\rho=2.68^*10^9$  т/мм³, Коэффициент Пуассона  $\eta=0.2$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda=3^*10^3$  Вт/мм\*К°, коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha=8.1^*10^6$  1/С°.

Материал "слабого" грунта (красный цвет на рис. 4,5) со свойствами: Модуль Юнга  $E=0,13^*10^5$  МПа, плотность  $\rho=2,71^*10^9$  т/мм³, Коэффициент Пуассона  $\eta=0,3$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda=3^*10^3$  Вт/мм\*К°, коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha=8.1^*10^{-6}$  1/С°.

Материал "сыпучего" очень слабого грунта (темнозеленый цвет на рис. 4,5) со свойствами: Модуль Юнга  $E = 0.011^*10^5$  МПа, плотность  $\rho = 2.65^*10^9$  т/мм³, Коэффициент Пуассона  $\eta = 0.3$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 3^*10^3$  Вт/мм\*К°, коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha = 8.1^*10^6$  1/С°.

Нагрузки включают в себя гравитационные силы горного массива, обделки тоннеля, путевого бетона и рельса пути. Эти силы определяется в КЭ модели относительно ускорения свободного падения, плотности используемого материала, а также относительно геометрических размеров моделируемых ко-



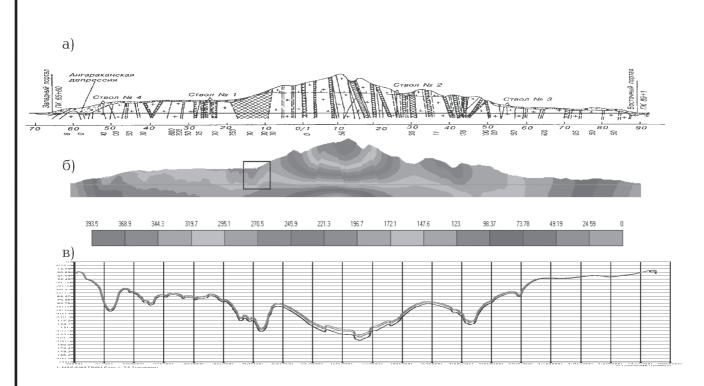


Рис. 7. Геологический разрез и перемещения в масштабе (мм) при воздействии гравитационных сил а)-геологический разрез; б) суммарные перемещения в модели горной перемычки; б) то же в тоннеле.

нструкций. Дополнительно рассматриваются различные варианты температурных и геодеформационных воздействий.

Расчет модели выполняется 17-20 часов. На рис. 7 показаны инженерно-геологический разрез, суммарные перемещения в мм всей модели и в точках верха и низа поперечного сечения тоннеля. Данный расчет выполнялся на приложение всей гравитационной нагрузки и служит иллюстрацией работы модели, а также на качественном уровне показывает неоднородный характер работы тоннеля по длине. Для определения количественных показателей НДС необходимы дополнительные приемы, учитывающие специфику передачи гор-

ного давления на обделку при различных строительных технологиях.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- 1. СНиП 32-04-97. Тоннели железнодорожные и автодорожные /Госстрой России. М.: ГП ЦПП, 1997. 19 с.
- 2. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир. -1975.  $542 \, \mathrm{c}$ .
- 3. Пыхалов А. А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин/Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. -М.:МАИ. 2006. 32 с.





Белокобыльский С.В., Кашуба В.Б.

УДК 693.546.3

# ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРИРУЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С БЕТОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ТЕХНОЛОГИЯХ ЗАГЛАЖИВАНИЯ

Важным этапом при проектировании вибрационных машин является изучение и управление структурно-реологическими свойствами материалов в процессе их переработки для обоснования оптимальных параметров механических воздействий, обеспечивающих минимальные энергетические затраты при предельно возможном сокращении длительности технологического процесса. Бетонная смесь представляет собой систему, состоящую из частиц твердой фазы различной крупности и воды. В силу адсорбционной способности частиц цемента при взаимодействии с водой образуется реакционно-активная система, в которой во взвешенном состоянии могут находиться частицы песка, щебня или гравия [2].

Физические свойства гетерогенных систем определяются в основном поверхностными явлениями, происходящими на границе раздела фаз, а их тип типом контакта между частицами твердой фазы. Рассмотренные авторами смеси обладают структурой с коагуляционными контактами, образующимися между частицами твердых фаз, разделенными прослойками жидкой дисперсной среды, равновесная фиксированная толщина которых соответствует минимуму свободной поверхностной энергии. Подобный тип контактов характеризуется обратимостью, т.е. после разрушениям/восстановлением их до первоначального уровня.

І. Для изучения физических свойств материалов математическими методами в реологии принято создавать идеальные модели с точно определенными свойствами. Этот способ заключается в построении моделей, состоящих из различных комбинаций механических элементов, в которых под действием соответствующих сил возникают перемещения

определенных видов, подобных тем, какими обладают материалы, поведение которых желательно описать. В рассматриваемой аспекте исследовании для модельного описания материалов в реологии используются следующие основные идеальные механические элементы:

- 1. элемент, характеризующий ньютоновскую идеальную вязкую жидкость, в виде поршня в цилиндре с идеальной жидкостью, перемещаемого в нем без трения;
- 2. элемент, характеризующий идеальное упругое твердое тело, подчиняющееся закону Гука, в виде пружины;
- 3. элемент, характеризующий пластичность, в виде груза, лежащего на плоскости, который начинает перемещаться с постоянной скоростью после достижения предельного напряжения сдвига.

Все идеальные механические элементы как и их производные, составленные путем последовательного или параллельного соединения основных идеальных механических элементов, принято называть моделями по именам ученых, которые впервые описали законы течения и деформирования различных материалов. На рис. 1 представлен ряд наиболее распространенных моделей. Внимание к этим вопросам не случайно и определяется тем обстоятельством, что диск рабочего магнитострикционного органа, находясь в непосредственном контакте со средой, формирует упругие свойства контакта. Последние определяют с учетом массовых свойств рабочего органа частотные диаграммы эффективной работы технологической системы. При детализированном рассмотрении упругой схемы рабочего органа, можно отметить, что он определяется приведенной упругостью нескольких последовательно сое-





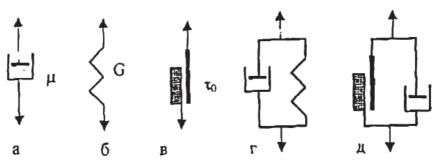


Рис. 1. Модели вязко-упруго-пластичных жидкостей: а- модель Ньютона (N-модель); б- модель Гука (H-модель); в- модель Сен-Венана (StV-модель); г- модель Кельвина (  $K=N \mid H$ ); д- модель Бинга-ма-Шведова (B=StV  $\mid N$ ); где через символы – и обозначены последовательное и параллельное соединение элементов.

диненных элементов. Поэтому реальная жесткость, отнесенная к рабочему органу, будет значительно меньше рассчитанной теоретически.

Основные реологические уравнения для простых моделей имеют вид: N- модель  $-\tau = \mu\dot{\gamma}$ ; H- модель  $m = G\gamma$ ; StV-модель  $\tau = \tau_0$  K- модель  $\tau = G\gamma + \mu\dot{\gamma}$ ; B- модель  $-\tau = \tau_0 + \mu_{n\lambda}\dot{\gamma}$ . Здесь  $-\tau_0 + \mu_{n\lambda}\dot{\gamma}$ .

Вместе с тем существует и ряд эмпирических зависимостей, так, например, известны для псевдопластичных сред: степенной закон Оствальда  $\tau = k \left| \gamma \right|^{n-1} \dot{\gamma}$ , n>1; Прандтля-Эйринга  $\tau = Aarch(\dot{\gamma} / B)$ ; закон Рейнера- Филиппова  $\tau = \left[ \mu_{\scriptscriptstyle \infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\scriptscriptstyle \infty}}{1 + (\tau / A)^2} \right]$  и другие. Для вяз-

копластичных сред можно назвать законы Гершеля- Балкли и другие. Известно, что свойства тиксотропных превращений структурированных дисперсных систем определяются двумя видами механических воздействий: в условиях непрерывного сдвига, при наложении вибрации либо совместное сочетание тех и других.

Специфическая особенность различных видов бетонных смесей, как отмечалось выше, состоит в том, что вследствие сильно развитой поверхности раздела фаз поверхностные явления в таких гетерогенных системах приобретают решающее значение по сравнению с другими видами связей. При вибрировании частицам среды сообщаются колебания, кото-

рые вызывают уменьшение внутреннего трения между ними. Уменьшение внутреннего трения происходит как за счет сообщаемой частицам различного градиента скорости, так и за счет того, что во время вибрирования, благодаря вводимой энергии, частицы ее раздвигаются.

Качественные и количественные связи различных процессов (явлений) целесообразнее устанавливать в виде обобщенных соотношений, полученных методами теории подобия и размерностей физических величин. Из гидродинамики известно, что подобие явлений течения в потоке жидкости обусловлено действием сил тяжести, инерции, внутреннего трения и характеризуется критериями Рейно-

трения и характеризуется критериями Рейно-  
льдса 
$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v l}{\mu}$$
 и Фруда  $Fr = \frac{v^2}{g l}$ , которые вклю-

чают независимые параметры: физические - коэффициент динамической вязкости  $\mu$ , плотность p и ускорение g свободного падения; кинематические - скорость v потока жидкости; геометрические - характерный размер l. Основными параметрами, характеризующими процесс тиксотропного разрушения структуры смесей при вибрировании, являются кинематические - амплитуда A и частота  $\omega$  колебаний, геометрические - площадь F лобовой поверхности, передающей вибрацию, и объем V вибрируемой смеси.

На основании вышеизложенного изменение эффективной вязкости бетонных смесей под действием вибрации можно описать уравнением [9]:

$$\frac{\mu}{\rho A^2 \omega} = k \left(\frac{A\omega^2}{g}\right)^{n_1} \left(\frac{FA}{V}\right)^{n_2}$$
 (при  $\frac{FA}{V} = 0.02...005$ ). (1)





Здесь k,  $n_{,\prime}$ ,  $n_{,2}$ - коэффициенты, определяемые экспериментально.

В этом уравнении соотношения  $\frac{\mu}{\rho A^2 \omega}$ ,  $\frac{A \omega^2}{q}$  являются модифициро-

ванными критериями Рейнольдса и Фруда для процессов вибрирования смесей. Критерий-симплекс FA/V характеризует эффективность геометрической формы поверхности вибратора. Чем больше его значение, тем выше коэффициент полезного действия вибромашины, определяемый как отношение количес-

тва энергии, потребляемой вибромашиной, к количеству энергии, поглаженной смесью. Предшествующими исследованиями [2] установлено, что жесткие бетонные смеси при интенсивности вибраций, характеризуюамплитудным значением ускорения щейся колебаний порядка 20...40 м/с, приближаются по своим свойствам к ньютоновским жидкостям.

При поверхностном вибрировании, которое используется в рассматриваемом важным является глубина распроцессе, пространения вибрации. Последняя определяет толщину слоя, участвующего в процессе заглаживания. Изучение закономерностей распространения колебаний позволили определить характер затухания колебаний, обусловленный поглощением энергии, которое является функцией не только структурно-реологических свойств сред, но и происходит вследствие расширения фронта волны. С рассматриваемых позиций свойства смесей характеризуются плотностью p, модулем объемной упругости E, скоростью V распространения колебаний, связь между которыми определяется зависимостью, а также коэффициентом затухания ш колебаний. На основе известных представлений о распространение колебаний в упруговязкопластичных средах принимаем во внимание зависимости изменения амплитуды колебаний:

Для линейной задачи:

$$A = A_0 e^{-\psi r}. (2)$$

Для цилиндрической задачи: 
$$A = \sqrt{\frac{r_0}{r}} A_0 e^{-\frac{\psi}{2}(r-r_0)}. \tag{3}$$

Здесь  $r_0$ ,  $A_0$  — соответственно радиус корпуса и амплитуды колебаний вибратора; А –

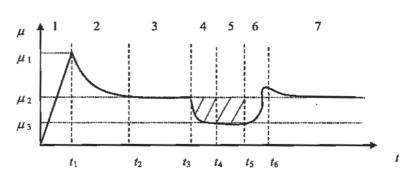


Рис. 2. Характер разрушения и восстановления структуры

текущее значение амплитуды колебаний смеси на расстоянии r от вибратора.

Характерной особенностью процесповерхностной обработки свежеуложенных бетонов предлагаемыми методами является сочетание сдвиговых деформаций и вибраций. На рис. 2 приведена типичная картина характера разрушения и восстановления вязкопластичных материалов в потоке при воздействии вибрации [1,2,4], которая свидетельствует о нелинейном характере свойств системы.

Для пояснения физических особенностей процесса приняты обозначения. 1 - зона эластической деформации; 2 - зона активного разрушения структуры материала; 3- зона установления равновесной степени разрушения структуры и течения с постоянной µ2 вязкостью; 4 - зона активного разрушения структуры при воздействии вибрации; 5 - зона равновесной степени разрушения структуры при вибрации и течении с постоянной µ, вязкостью; 6 -зона тиксотропного восстановления структуры в потоке при прекращении вибрации; 7 зона разрушения в потоке упрочненной структуры с последующим установлением стационарного течения с постоянной  $\mu_2$  вязкостью.

Характер разрушения и восстановления структуры смеси объясняется следующим. При достижении равновесной степени разрушения структуры в потоке и течении ее при заданном градиенте скорости с постоянной вязкостью происходит разрушение поперечных к направлению потока связей и ориентация анизотропных частиц твердой фазы вдоль линий тока. Чем выше скорость сдвига, тем меньше их восстанавливается в потоке. Наложение на систему вибрационного поля сопро-





вождается более глубоким разрушением структуры и, тем самым, уменьшением ее вязкости, но в то же время приводит к нарушению ориентации частиц в процессе их колебаний. После прекращения вибрации дезориентация частиц и образование прочных коагуляционных контактов по наиболее лиофобным участкам приводит к ускоренному тиксотропному восстановлению структуры и росту вязкости в потоке до уровня, превышающего равновесный уровень до вибрации.

II. Таким образом, процесс вибрационной обработки изделий, отформованных из жестких бетонных смесей, связан с тиксотропным разжижением смеси и выделением водопесчаноцементной составляющей, образующей слой пристенного скольжения, необходимый для качественной обработки поверхности. В статье рассматривается дисковое заглаживающее вибрационное устройство с магнитострикционным приводом, обеспечивающим частоту колебаний в диапазоне 8-15 кГц [3].

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: 1-цилиндрический корпус, 2-вращающийся корпус магнитостриктора, 3-возбудитель магнитострикционного вибратора, 4-концентратор, 5-приводной вал, 6-рама портала, 7-резинометалические рукава, 8-заглаживающий диск, 9-скользящие контакты магнитостриктора, 10-резиновые манжеты, 11-заглаживающее кольцо, 12-клиновой ремень. Преимуществом такой конструкции яв-

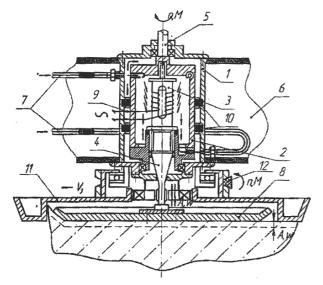


Рис. 3. Дисковое заглаживающее устройство с магнитострикционным приводом.

ляется высокое качество обработки поверхностей бетонных изделий, отформованных из жестких бетонных смесей. Преимущество обработки достигается за счет возможности получения высокочастотных периодических возмущений при сравнительно малых амплитудах перемещений заглаживающего диска в вертикальной плоскости. Вибрационный заглаживающий орган позволяет создавать динамическое воздействие на бетонную смесь в несколько раз превышающее статистическую составляющую, что существенно повышает заглаживающую способность машины с вибрационным рабочим органом по сравнению с обычными машинами невибрационного действия. Заглаживающая способность, в свою очередь, напрямую влияет на качество шероховатости поверхности бетонных изделий [4].

Известно, что минимальное вибропогружение заглаживающего диска в бетонную смесь препятствует появлению волнообразований, борозд, раковин и т.п. на обрабатываемой поверхности, а, следовательно, ведет к повышению качества (шероховатости) поверхности изделий [5]. Однако качество обработанной поверхности бетонного изделия — это не единственный показатель бетона, на который могут оказывать влияние высокочастотные колебания при обработке поверхности изделия. С теоретической точки зрения в процессе взаимодействия вибрационного рабочего органа с обрабатываемой бетонной смесью связи между ее компонентами нарушаются, и смесь становится наиболее подвижной. Разжижение бетонной смеси способствует перераспределению частиц в наиболее плотную упаковку с одновременным удалением из бетонной смеси защемленного воздуха, что оказывает влияние на увеличение прочностных свойств затвердевшего бетона.

Воздушные пузырьки в бетонной смеси в результате периодических колебаний способны к миграции. Режим движения пузырьков определяется критерием Рейнольдса [6]

$$Re = Vd \frac{\rho}{n}, \tag{4}$$

где: η - вязкость жидкой фазы смеси, с - плотность среды; d - диаметр пузырьков, V - скорость подъема пузырьков.

Из (4) определим диаметр пузырька, способного к подъему со скоростью V:

$$d = \frac{\operatorname{Re} \rho}{n} \,. \tag{5}$$





На воздушный пузырек, всплывающий в смеси действуют три силы: подъемная, сила сопротивления окружающей среды и сила поверхностного натяжения. Для воздушных образований диаметром до 3 мм их форму можно считать сферической, а движение отдельного пузырька следует рассматривать как движение жесткой сферы в колеблющейся среде с вязким сопротивлением. Сила сопротивления окружающей среды представляет собой силу внутреннего трения и сопротивления колебательным движениям в волновом поле вязкой среды и равна [5, 7].

$$F = 6\pi \eta r \left( 1 + r \sqrt{\frac{\rho \omega}{2\eta}} \right) \xi , \qquad (6)$$

где:  $\eta$ - вибровязкость среды, r — радиус частицы, p- плотность среды,  $\omega$ - частота колебаний,  $\xi$ - скорость колебаний. Тогда уравнение движения частицы можно записать в виде:

$$\label{eq:continuity} \begin{split} &\left[\omega\!\!\left(M_{\scriptscriptstyle 0} + M'\right) \!-\! 6\pi\eta r\!\!\left(1 \!+\! r\sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta}}\right)\right]\!\!\left(\xi_{\scriptscriptstyle c} - \!\xi_{\scriptscriptstyle h}\right) \!=\! _{\rm HO\; GHO} \\ &=\! \omega\!\!\left(M \!-\! M_{\scriptscriptstyle 0}\right)\!\!\xi_{\scriptscriptstyle h'} \end{split}$$

где M - масса частицы,  $M_{\scriptscriptstyle 0}$  - масса среды в объеме, равном объему частицы; M - присоединительная масса частицы;  $\xi_{\scriptscriptstyle h}$ ,  $\xi_{\scriptscriptstyle c}$  - скорость частицы и среды.

Решая уравнение, получаем выражение для отношения скорости частицы и скорости среды или отношение их амплитуд:

$$\frac{\xi_h}{\xi_c} = \frac{A_h}{A_c} = \frac{1 + \frac{1}{\Omega} \left( 1 + r \sqrt{\frac{\rho \omega}{2\eta}} \right)}{\frac{M + M'}{M_0 + M'} + 1 + \frac{1}{\Omega} \left( 1 + r \sqrt{\frac{\rho \omega}{2\eta}} \right)}, \quad (8)$$

$$\Omega = \frac{f}{f_q} = \frac{f(M_0 + M')}{3\eta r} = \frac{\omega(M_0 + M')}{6\pi\eta r}.$$
 (9)

Здесь f — частота колебаний,  $\mathrm{f_{\scriptscriptstyle g}}$  — характеристическая частота.

Из (9) определим значение частоты f, при которой сила трения между воздушными пузырьками и средой приближается к нулю:

$$f > \left(\frac{2}{\sqrt{r^2 \pi \frac{\rho}{n} + \frac{4}{f_a} - \sqrt{r^2 \pi \frac{\rho}{\eta}}}}\right)^2. \tag{10}$$

Подставив в (10) значение  $f_{g'}$  которое в случае воздушных пузырьков при  $\rho_0=0$  будет равно:

$$f_g = \frac{9\eta}{\left(9\pi r^2 \rho\right)},\tag{11}$$

найдем окончательное выражение для частоты:

$$f_g > \frac{9\eta}{\pi r^2 \rho} \,. \tag{12}$$

Из (12) следует, что для удаления пузырьков воздуха, с уменьшением их радиуса, вынужденная частота колебаний должна существенно повышаться вплоть до звукового и ультразвукового диапазонов. Следовательно, ультразвуковой диапазон колебаний создает условия удаления воздушных пузырьков малого диаметра и тем самым значительно повышает плотность и прочность бетонных изделий.

Таким образом, для обеспечения заданного качества поверхности обрабатываемых изделий при одновременном повышении их плотности и прочности частота колебаний ВДРО с магнитострикционным приводом должна удовлетворять условию (12).

В заключение отметим, что обеспечение чистоты поверхности бетонных изделий, обрабатываемых высокочастотным заглаживающим органом будет определяться как требованиями минимального вибропогружения заглаживающего диска, так и реологией течения бетонной смеси, находящейся в зоне действия рабочего органа. Минимальное вибропогружение заглаживающего диска в бетонную смесь препятствует появлению волнообразований, борозд, раковин и т.п. на обрабатываемой поверхности, а, следовательно, ведет к повышению качества (шероховатости) поверхности изделия.

На основе теории течения бетонных смесей можно утверждать, что вязкость после начала разрушения структуры бетонной смеси рабочим органом, можно рассматривать как итоговую характеристику происходящих в системе массовых случайных явлений и описывать ее изменение на основе функции Гаусса:

$$\eta = \eta_{\infty} + \left(\eta_{0} - \eta_{\infty}\right) e^{\frac{\left(\tau - \tau_{k}\right)^{2}}{2\left(\tau_{\delta} - \tau_{k}\right)^{2}}},\tag{13}$$

где  $\eta_0$  - наибольшая вязкость практически неразрушенной структуры,  $\eta_\infty$  - наименьшая вязкость практически разрушенной струк-

(7)





туры, то- условное граничное напряжение практически неразрушенной структуры, т 2 параметр, по своему физическому смыслу характеризующий среднюю величину прочности структуры.

С учетом течения до начала разрушеструктуры, изменение вязкости, как функции действующего касательного напряжения, можно представить в общем случае уравнениями:

$$\eta = \infty$$
 $\eta = \eta_0$ 
 $\eta = \eta_0$ 
 $\eta = \eta_0$ 
 $\eta = \tau_0 \le \tau \le \tau_r$ 
(14)

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})e^{-\frac{(\tau - \tau K)^2}{2(\tau \delta - \tau K)^2}}$$
 при  $\tau \leq \tau_0$ ,

позволяющими описать процесс течения градиентного слоя бетонной смеси. При воздействии высокочастотного заглаживающего рабочего органа, бетонная смесь, разжижаясь, течет в двух направлениях (рис. 4). Общий расход материала равен сумме расходов через сечения ВВ, и АА,; обозначим последние соответственно  $Q_{\scriptscriptstyle B}$  и  $Q_{\scriptscriptstyle A}$ .

На заглаживающий диск, при его поступательном движении набегает поток расходом:

$$Q_{ya6} = V_3 h' R, \tag{15}$$

где  $V_{_{3}}\,$  - скорость поступательного движения рабочего органа,  $h' = h_0 + h_1$ , R - радиус диска.

В соответствии с условием неразрывности потока условие отсутствия макродефектов поверхности заглаживаемого изделия можно записать в виде:

$$Q_{na6} = Q_A + Q_B. \tag{16}$$

 $Q_{_{\mathit{Ra}\mathcal{\delta}}} = Q_{_{A}} + Q_{_{B}} \,. \tag{16}$  Расход в сечении  $\mathrm{BB}_{_{1}}$  с некоторым приближением может быть представлен как:

$$Q_{B} = b_{1} + h_{1} + V_{\Delta} , (17)$$

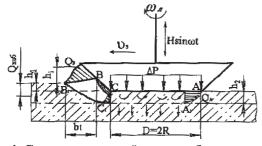


Рис. 4. Схема взаимодействия рабочего органа с поверхностью бетонной смеси.

здесь  $V_{_{\Delta}}$  — окружная скорость диска,  $b_{_{1}}$  — ширина волны смеси, находящейся перед диском, h, — высота волны.

В соответствии с законом течения бетонной смеси, выведенным для плоской щели [8], можно записать, что

$$\eta = \frac{2}{3} \frac{\left(P + \frac{M + A\omega^2}{S_1}\right) h_2^3}{Q_A} , \qquad (18)$$

где Р – давление рабочего органа на обрабатываемую поверхность,  $\mathbf{h}_{_{2}}$  — толщина градиентного слоя, S<sub>1</sub> - площадь заглаживающего диска.

Уравнение расхода в сечении АА, с учетом того, что вязкость может быть представлена как функция действующего касательного напряжения [137], можно записать в виде:

$$Q_A = 0$$
 при  $\tau \le \tau_0$ , (19)

$$\eta = \frac{2}{3} \frac{\left(P + \frac{M + A\omega^2}{S_1}\right) h_2^3}{\eta_0 R} \quad \text{при } \tau_0 \le \tau \le \tau_r , \quad (20)$$

$$\eta = \frac{2}{3} \frac{\left(P + \frac{M + A\omega^2}{S_1}\right)}{R(\eta_0 - \eta_\infty)e^{-\frac{(\tau - \tau K)^2}{2(\tau \delta - \tau K)^2}}} \text{ при } \tau > \tau_r.$$
 (21)

При напряжениях в градиентном слое больших предельного напряжения сдвига, но меньших условно граничного напряжения практически неразрушенной структуры  $\tau_0 \le \tau \le \tau$ , происходит разрушение наиболее слабых связей бетонной смеси и начинается течение с вязкостью  $\eta_0$ . В результате чего к поверхности трения выделяется цементно-песчаное молочко, необходимое для сглаживания неровностей поверхности. В этом случае наблюдается наиболее качественная обработка поверхности. Окончательное условие отсутствия макродефектов на заглаживаемой поверхности запишется:

$$\eta = \frac{1}{\left(h_0 + h_3\right)} \left[ \frac{b_1 h_1 V_g}{R} + \frac{2}{3} \frac{\left(P + \frac{M + A\omega^2}{S_1}\right) h_2^3}{\eta_0 R} \right]. (22)$$

Величина  $\eta_0$  в выражении (22) представляет собой вязкость практически неразру-





шенной структуры и равна вязкости бетонной смеси в начале процесса обработки. Поэтому целесообразно выразить вязкость смеси через частоту из уравнения (21), обуславливающего оптимальные условия повышения прочности изделия при его высокочастотной обработке. Тогда вязкость смеси будет определяться:

$$\eta = \frac{\pi r^2 \rho f}{9} \,, \tag{23}$$

где r — средневзвешенный радиус воздушных пузырьков в отформованной жесткой бетонной смеси, р - плотность бетонной смеси.

Представим круговую частоту в уравнении (22) как  $\omega = 2nf$  и подставим вместо  $3_0$  зависимость (23), тогда:

$$\eta = \frac{1}{(h_0 + h_3)} \left[ \frac{b_1 h_1 V_g}{R} + \frac{18(P + MA(2\pi f)^2) h_2^3}{3\pi r^2 \rho f R} \right]. \quad (24)$$

Таким образом, уравнение (24) представляет собой условие бездефектной обработки поверхности бетонных изделий, отформованных из жестких бетонных смесей, с учетом одновременного повышения прочностных свойств изделий. При этом частота f и радиус диска R = D/2 в выражении (24) должны соответствовать условию минимального вибропогружения заглаживающего диска.

### **ВИБЛИОГРАФИЯ**

1. Кашуба В.Б., Мамаев Л.А., Ситов И.С., Вершинский Н.А. Бездефектное заглаживание бетонных поверхностей с учетом по-

- вышения прочностных свойств бетонного изделия, обработанного высокочастотным рабочим органом // Труды международной научно-технической конференции Часть 7. «Интерстроймех-2005». Тюм. ГНГУ Тюмень. 2005. С. 47-54.
- 2. Мамаев Л.А., Кононов А.А., Герасимов С.Н., Кашуба В.Б. Экспериментальные исследования в области обработки бетонных поверхностей. БрГУ. Братск. 2006. 146с.
- 3. Мамаев Л.А., Кононов А.А., Герасимов С.Н., Кашуба В.Б. Виброзаглаживающее устройство с магнитострикционным приводом // Патент РФ № 2279975 от 20.12.04.
- 4. Герасимов С.Н. Определение рациональных параметров и режимов работы вибрационного дискового рабочего органа для обработки бетонных поверхностей // Дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук. БрГУ. Братск. 2003. 198с.
- 5. Гранат Н.Л. Движение твердого тела в пульсирующем потоке вязкой жидкости. // Механика и машиностроение.- 1960. № 1. С. 127-142
- 6. Гуняло Ю.П., Резанов Ю.С., Сергеев Ю.А. Диффузионный поток на деформированный газовый пузырь при больших числах Райнольдса // Изв. АН СССР, Серия механика жидкости и газа. 1976. №4. С. 421-426.
- 7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.Н. Механика сплошных сред. М.: Наука. 1965.- 476с.
- 8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1972. 548c.
- 9. Мамаев Л.А. Исследование процессов рельефной обработки бетонных поверхностей // Дисс. на соск. учен. степени канд. техн. наук. ЛИСИ, Ленинград 1979. 194с.





Елисеев С.В., Упырь Р.Ю.

УДК 656.001

### РЫЧАЖНЫЕ СВЯЗИ В ПЕРЕДАЧЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В механических колебательных системах рычажные связи могут оказывать заметное влияние на расширение возможностей изменять определенным образом динамическое состояние системы [1÷4], что представляет интерес в подходах, ориентированных на использование структурных интерпретаций.

Рассмотрим простейшие колебательные системы с рычагами первого и второго рода.

- I. <u>Рычаги первого рода.</u>
- 1.1. Система, содержащая рычажную связь первого рода.

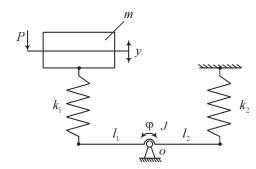


Рис. 1. Расчетная схема с рычагом первого рода.

Будем полагать, что представленной на рис.1, коэффициент приведенной жесткости системы определиться по формуле:

> $K_{p} = \frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{-}^{1} + K_{-}^{2}},$ (1)

где

$$K_p^1 = k_1, (2)$$

$$K_p^2 = k_2 \cdot \frac{I_2^2}{I^2} \,. \tag{3}$$

Произведем подстановку выражений (2) и (3) в (1) и после преобразований получим:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}}}{k_{1} + k_{2} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}}}.$$
 (4)

Докажем справедливость выражений (1)-(4). Запишем уравнения кинетической и потенциальной энергии для схемы, приведенной на рис.1:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{y}^{2} + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^{2}, \qquad (5)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_{1} (y - \varphi \cdot l_{1})^{2} + \frac{1}{2} k_{2} l_{2}^{2} \varphi^{2}.$$

Используя уравнение Лагранжа 2-го рода отсутствии СИЛ трения, найдем дифференциальные уравнения движения данной системы

$$m\ddot{y} + k_1 y - k_1 l_1 \varphi = 0,$$

$$J\ddot{\varphi} - k_1 l_1 y + \varphi \left(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2\right) = 0.$$
 (6)

$$J\ddot{\varphi} - k_1 l_1 y + \varphi \left( k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 \right) = 0.$$
 (7)

Структурная схема эквивалентной в динамическом отношении, системы автоматического управления (САУ) для расчетной схе-

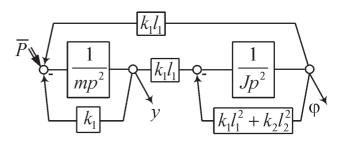


Рис. 2. Структурная схема системы (по рис.1) с рычажной связью первого рода.

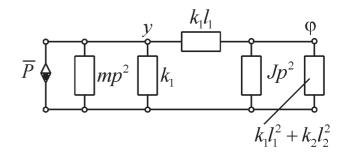


Рис. 3. Дуальная механическая цепь системы с рычажной связью первого рода.





мы, приведенной на рис.1, имеет вид, как показано на рис.2. Другой вид структурной интерпретации в виде [1] дуальной механической цепи представлен на рис.3.

Если принять, что  $J\ddot{\phi}=0$ , то из уравнения (7) можно найти

$$\varphi = y \frac{k_1 l_1}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}.$$
 (8)

Подставим (8) в (6) и после преобразования получим

$$m\ddot{y} + K_p \cdot y = 0, \tag{9}$$

где

$$K_p = \frac{k_1 k_2 l_2^2}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}. (10)$$

Как можно увидеть, выражения (4) и (9) совпадают. Это означает, что предложенный подход дает необходимые результаты. Приняв  $i=\frac{l_2}{l_1}$ , получаем окончательное выраже-

ние для приведенного коэффициента жесткости:

$$K_p = \frac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2}. (10)$$

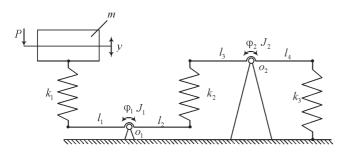


Рис. 4. Расчетная схема с двумя рычагами первого рода.

### **1.2.** Система, содержащая две рычажные связи первого рода.

Рассмотрим систему из рычагов, представленную на рис.4.

Пусть для схемы, представленной на рис.4, коэффициент приведенной жесткости системы определиться по формуле:

$$K_{p} = \frac{\left(\frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}}\right) \cdot K_{p}^{3}}{\left(\frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}}\right) + K_{p}^{3}},$$
(11)

ΓΛθ

$$K_p^1 = k_1,$$
 (12)

$$K_p^2 = k_2 \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2},\tag{13}$$

$$K_p^3 = k_3 \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2} \cdot \frac{l_4^2}{l_3^2}.$$
 (14)

Произведем подстановку выражений (12), (13) и (14) в (11) и после некоторых преобразований найдем, что:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}}}{k_{1}\left(k_{2} + k_{3} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}}\right) + k_{2}k_{3} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}}}.$$
 (15)

Докажем справедливость выражений (11)-(15). Запишем уравнения кинетической и потенциальной энергии для схемы, приведенной на рис.4:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^{2} + \frac{1}{2}J_{1}\dot{\varphi}_{1}^{2} + \frac{1}{2}J_{2}\dot{\varphi}_{2}^{2}, \qquad (16)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_{1}(y - \varphi_{1}l_{1})^{2} + \frac{1}{2}k_{2}(\varphi_{2}l_{3} - \varphi_{1}l_{2})^{2} + \frac{1}{2}k_{3}l_{4}^{2}\varphi_{2}^{2}.$$

Используя уравнение Лагранжа 2-го рода в предположении малости влияния сил трения запишем дифференциальные уравнения движения данной системы:

$$m\ddot{y} + k_1 y - k_1 l_1 \phi_1 = 0,$$
 (17)

$$J_{1}\ddot{\varphi}_{1} - k_{1}l_{1}y + \varphi_{1}\left(k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}l_{2}^{2}\right) - k_{2}l_{2}l_{3}\varphi_{2} = 0, (18)$$

$$J_{2}\ddot{\varphi}_{2} + \varphi_{2}\left(k_{2}l_{3}^{2} + k_{3}l_{4}^{2}\right) - k_{2}l_{2}l_{3}\varphi_{1} = 0. \quad (19)$$

Структурная схема эквивалентной САУ для схемы, приведенной на рис.4, примет вид, как показано на рис.5. При этом структурную интерпретацию этой же системы в виде дуальной механической цепи можно представить на рис.6.

Если полагать моменты инерции рычагов малыми, то  $J_1\ddot{\phi}_1=0$ ,  $J_2\ddot{\phi}_2=0$  , тогда из уравнения (19) следует:

$$\varphi_2 = \varphi_1 \frac{k_2 l_2 l_3}{k_2 l_3^2 + k_3 l_4^2}.$$
 (20)

Подставляя (20) в (18) можно найти

$$\varphi_{1} = y \frac{k_{1} l_{1} \left( k_{2} l_{3}^{2} + k_{3} l_{4}^{2} \right)}{k_{1} l_{1} \left( k_{2} l_{3}^{2} + k_{3} l_{4}^{2} \right) + k_{2} k_{3} l_{2}^{2} l_{4}^{2}}.$$
 (21)





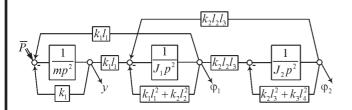


Рис.5. Структурная схема, системы содержащей две рычажные связи первого рода.

Подставив (8) в (17), после преобразования получим уравнение движения:

$$m\ddot{y} + K_p \cdot y = 0, \tag{22}$$

где

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2} \cdot l_{3}^{2}}}{k_{1}\left(k_{2} + k_{3} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}}\right) + k_{2}k_{3} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}}}.$$
 (23)

Отметим, что выражения (15) и (23) совпадают, что и требовалось доказать. Приняв  $i_1=\frac{l_2}{l_1}$  и  $i_2=\frac{l_4}{l_3}$  , запишем окончательное выра-

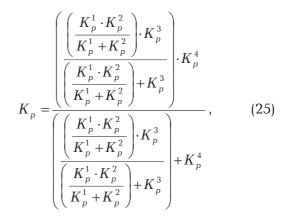
жение для приведенного коэффициента жесткости системы:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2}}{k_{1}(k_{2} + k_{3} \cdot i_{2}^{2}) + k_{2}k_{3} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2}}.$$
 (24)

**1.3.** Система, содержащая три рычажные связи первого рода.

Усложняя задачу, перейдем к системе, представленной на рис.7.

Будем полагать, что для схемы, представленной на рис. 7, коэффициент приведенной жесткости системы определиться по формуле:



где

$$K_p^1 = k_1, \tag{26}$$

$$K_p^2 = k_2 \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2},\tag{27}$$

$$K_p^3 = k_3 \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2} \cdot \frac{l_4^2}{l_3^2},\tag{28}$$

$$K_p^3 = k_3 \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2} \cdot \frac{l_4^2}{l_3^2} \cdot \frac{l_6^2}{l_5^2}.$$
 (29)

Произведем подстановку выражений (26)-(29) в (25) и после некоторых преобразований получим:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3}k_{4} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}} \cdot \frac{l_{6}^{2}}{l_{5}^{2}}}{k_{1}\left[k_{2}\left(k_{3}+k_{4} \cdot \frac{l_{6}^{2}}{l_{5}^{2}}\right)+k_{3}k_{4} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}} \cdot \frac{l_{6}^{2}}{l_{5}^{2}}\right]+k_{2}k_{3}k_{4} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}} \cdot \frac{l_{6}^{2}}{l_{5}^{2}}}.$$
(30)

Докажем справедливость выражений (25)-(30). Запишем уравнения кинетической и потенциальной энергии для схемы, приведенной на рис.7:

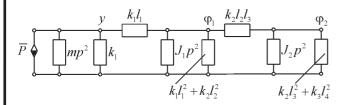


Рис. 6. Дуальная механическая цепь системы, содержащей две рычажные связи первого рода.

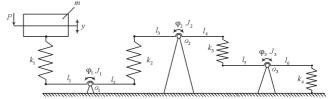


Рис.7. Расчетная схема с тремя рычагами первого рода.





$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^{2} + \frac{1}{2}J_{1}\dot{\phi}_{1}^{2} + \frac{1}{2}J_{2}\dot{\phi}_{2}^{2} + \frac{1}{2}J_{3}\dot{\phi}_{3}^{2}, \quad (31)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1(y - \varphi_1 \cdot l_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(\varphi_2 \cdot l_3 - \varphi_1 \cdot l_2)^2 +$$

$$+\frac{1}{2}k_3(\varphi_3 \cdot l_5 - \varphi_2 \cdot l_4)^2 + \frac{1}{2}k_4l_6^2\varphi_3^2.$$

Используя уравнение Лагранжа 2-го рода при малом влиянии сил трения, запишем дифференциальные уравнения движения данной системы:

$$m\ddot{y} + k_1 y - k_1 l_1 \varphi_1 = 0,$$
 (32)

$$\begin{split} J_{1}\ddot{\phi}_{1} - k_{1}I_{1}y + &\phi_{1}\left(k_{1}I_{1}^{2} + k_{2}I_{2}^{2}\right) - k_{2}I_{2}I_{3}\phi_{2} = 0 \text{ , (33)} \\ J_{2}\ddot{\phi}_{2} + &\phi_{2}\left(k_{2}I_{3}^{2} + k_{3}I_{4}^{2}\right) - k_{2}I_{2}I_{3}\phi_{1} - k_{3}I_{4}I_{5}\phi_{3} = 0 \text{, (34)} \\ J_{3}\ddot{\phi}_{3} + &\phi_{3}\left(k_{3}I_{5}^{2} + k_{4}I_{6}^{2}\right) - k_{3}I_{4}I_{5}\phi_{2} = 0 \text{ . (35)} \end{split}$$

Структурная схема эквивалентной САУ для расчетной схемы, приведенной на рис.7, приведена на рис.8. Соответствующая ей структурная интерпретация в виде дуальной механической цепи показана на рис.9.

Примем  $J_1\ddot{\phi}_1=0$ ,  $J_2\ddot{\phi}_2=0$ ,  $J_3\ddot{\phi}_3=0$  и производя последовательные преобразования, выделим коэффициент приведенной жесткости для данной системы:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3}k_{4} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}} \cdot \frac{l_{6}^{2}}{l_{5}^{2}}}{k_{1}\left[k_{2}\left(k_{3}+k_{4} \cdot \frac{l_{6}^{2}}{l_{5}^{2}}\right)+k_{3}k_{4} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}} \cdot \frac{l_{6}^{2}}{l_{5}^{2}}\right]+k_{2}k_{3}k_{4} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{l_{1}^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{l_{3}^{2}} \cdot \frac{l_{6}^{2}}{l_{5}^{2}}}.$$
(36)

Приняв  $i_1=rac{l_2}{l_1}$ ,  $i_2=rac{l_4}{l_3}$  и  $i_3=rac{l_6}{l_5}$ , найдем

окончательное выражение для приведенного коэффициента жесткости системы:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3}k_{4} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}}{k_{1}\left[k_{2}\left(k_{3} + k_{4} \cdot i_{3}^{2}\right) + k_{3}k_{4} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}\right] + k_{2}k_{3}k_{4} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}}.$$
 (37)

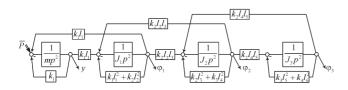


Рис. 8. Структурная схема системы, содержащей три рычажные связи первого рода.

Все полученные результаты могут быть сведены в таблицу 1.

Полученная формула справедлива также для механических колебательных систем, содержащих п рычажных связей первого рода. В это случае выражение, для коэффициента приведенной жесткости, примет вид:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}...}{k_{1}\left[k_{2}\left[...\left[k_{n}\left[k_{n-1}\left(k_{n}+k_{n+1}\cdot i_{n}^{2}\right)+k_{n}k_{n+1}\cdot i_{n-1}^{2}\cdot i_{n}^{2}\right]+\right.\right.\right]} \\ \rightarrow \frac{....k_{4}\cdot\left(i_{1}^{2}\cdot i_{2}^{2}...i_{n}^{2}\right)}{+k_{n-1}k_{n}k_{n+1}\cdot i_{n-2}^{2}\cdot i_{n-1}^{2}\cdot i_{n}^{2}\left[...\right]+k_{2}k_{3}...k_{n+1}\cdot\left(i_{1}^{2}\cdot i_{2}^{2}...i_{n}^{2}\right)}$$

$$(38)$$

В заключение можно по поводу рычажных связей первого рода, сделать несколько предварительных выводов:

- 1. Согласно исследованиям, проведенным выше, можно утверждать, что в системе, состоящей из элементов, соединенных между собой рычажными связями первого рода, соединение принимает форму последовательного, с учетом особенности рычажной связи первого рода.
- 2. Коэффициент приведенной жесткости для системы с п рычагами первого рода, в общем случае принимает вид:

$$K_{p} = \frac{\left( \left( \frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}} \right) \dots \right) \cdot K_{p}^{n-1}}{\left( \left( \frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}} \right) + \dots \right) + K_{p}^{n-1}} \right) \cdot K_{p}^{n}} - \left( \frac{\left( \frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}} \right) \dots \right) \cdot K_{p}^{n-1}}{\left( \left( \frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}} \right) + \dots \right) + K_{p}^{n-1}} \right) + K_{p}^{n}}$$

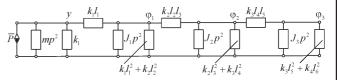


Рис. 9. Дуальная механическая цепь системы содержащей три рычажные связи первого рода





### Табл.1 Значения приведенной жесткости для систем с рычажной связью первого рода.

Число рычагов	Расчетная схема	Приведенный коэффициент жесткости системы		
1.	$k_1 = \begin{pmatrix} m \\ l_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J \\ l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_2 \\ k_2 \end{pmatrix}$	$K_p = rac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2}$		
2.	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2}}{k_{1}\left(k_{2} + k_{3} \cdot i_{2}^{2}\right) + k_{2}k_{3} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2}}$		
	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3}k_{4} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}}{k_{1}\left[k_{2}\left(k_{3} + k_{4} \cdot i_{3}^{2}\right) + k_{3}k_{4} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}\right] + k_{2}k_{3}k_{4} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}}$		

где

$$K_p^1 = k_1,$$

$$K_p^2 = k_2 \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2}, \dots,$$

$$K_p^{n-1} = k_{n-1} \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2} \cdot \dots \cdot \frac{l_n^2}{l_{n-1}^2},$$

$$K_p^n = k_n \cdot \frac{l_2^2}{l_1^2} \cdot \dots \cdot \frac{l_n^2}{l_{n-1}^2} \cdot \frac{l_{n+2}^2}{l_{n+1}^2}.$$

### **II.** Рычаги второго рода.

**2.1.** Система, содержащая рычаг второго рода.

Рассмотрим схему, представленную на рис.10:

Будем полагать, что для схемы, представленной на рис. 10, коэффициент приведенной жесткости системы определиться по формуле:

$$K_{p} = \frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}},$$
 (39)

где

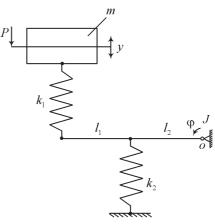
$$K_{p}^{1} = k_{1}. (40)$$

$$K_p^2 = k_2 \cdot \frac{l_2^2}{\left(l_1 + l_2\right)^2}.$$
 (41)

Произведя подстановку выражений (27) и (28) в (26), после преобразований получим:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{\left(l_{1} + l_{2}\right)^{2}}}{k_{1} + k_{2} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{\left(l_{1} + l_{2}\right)^{2}}}.$$
(42)

Для доказательства справедливости выражений (26)-(29) запишем уравнения кинетической и потенциальной энергии для схемы, приведенной на рис.10:



(41) Рис.10. Расчетная схема с рычагом второго рода.





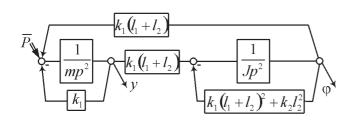


Рис. 11. Структурная схема системы с рычажной связью второго рода.

$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^{2} + \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^{2}, \qquad (43)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_{1}(y - \varphi \cdot (l_{1} + l_{2}))^{2} + \frac{1}{2}k_{2}l_{2}^{2}\varphi^{2}.$$

Используя уравнение Лагранжа 2-го рода при малом влиянии сил трения, запишем дифференциальные уравнения движения данной системы:

$$m\ddot{y} + k_1 y - k_1 (l_1 + l_2) \varphi = 0,$$
 (44)

$$J\ddot{\varphi} - k_1(l_1 + l_2)y + \varphi(k_1(l_1 + l_2)^2 + k_2l_2^2) = 0.$$
 (45)

Структурная схема эквивалентной САУ для расчетной схемы, приведенной на рис.10, представлена на рис.11, а соответствующая структурная интерпретация в виде дуальной механической цепи соответственно на рис.12.

Если принять  $J\ddot{\varphi}=0$ , то из уравнения (32) можно выразить:

$$\varphi = y \frac{k_1(l_1 + l_2)}{k_1(l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2}.$$
 (46)

Подставив (46) в (44), после преобразования получим

$$m\ddot{y} + K_p \cdot y = 0, \tag{47}$$

где

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}(l_{1} + l_{2})^{2}}{k_{1} + k_{2} \frac{l_{2}^{2}}{(l_{1} + l_{2})^{2}}}.$$
 (48)

Как можно увидеть, выражения (42) и (48) совпадают. Это означает, что предложенный метод дает необходимые результаты. Приняв  $i = \frac{l_2}{\left(l_1 + l_2\right)}$ , можно найти окончательное выра-

жение для приведенного коэффициента жесткости:

$$K_p = \frac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2}. (49)$$

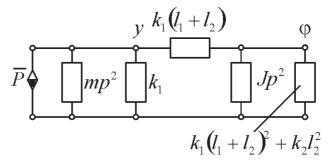


Рис.12. Дуальная механическая цепь системы с рычажной связью второго рода.

**2.2.** <u>Система, содержащая два рычага второго рода.</u>

Рассмотрим систему из рычагов, представленную на рис.13.

Пусть для схемы, представленной на рис.13, коэффициент приведенной жесткости системы определяется по формуле:

$$K_{p} = \frac{\left(\frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}}\right) \cdot K_{p}^{3}}{\left(\frac{K_{p}^{1} \cdot K_{p}^{2}}{K_{p}^{1} + K_{p}^{2}}\right) + K_{p}^{3}},$$
(50)

Γλε

$$K_p^1 = k_1,$$
 (51)

$$K_p^2 = k_2 \cdot \frac{l_2^2}{\left(l_1 + l_2\right)^2},$$
 (52)

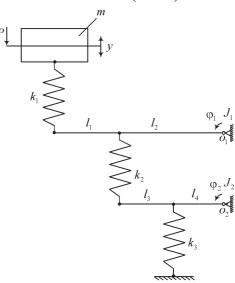


Рис. 13. Расчетная схема с двумя рычагами второго рода.





$$K_p^3 = k_3 \cdot \frac{l_2^2}{\left(l_1 + l_2\right)^2} \cdot \frac{l_4^2}{\left(l_3 + l_4\right)^2}.$$
 (53)

Произведем подстановку выражений (51), (52) и (53) в (50) и после некоторых преобразований получим:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{\left(l_{1} + l_{2}\right)^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{\left(l_{3} + l_{4}\right)^{2}}}{k_{1}\left(k_{2} + k_{3} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{\left(l_{3} + l_{4}\right)^{2}}\right) + k_{2}k_{3} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{\left(l_{1} + l_{2}\right)^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{\left(l_{3} + l_{4}\right)^{2}}}.$$
 (54)

Докажем справедливость выражений (37)-(41). Для этого запишем уравнения кинетической и потенциальной энергии для схемы, приведенной на рис.4:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^{2} + \frac{1}{2}J_{1}\dot{\phi}_{1}^{2} + \frac{1}{2}J_{2}\dot{\phi}_{2}^{2}, \qquad (55)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y - \varphi_1 (l_1 + l_2))^2 +$$

$$+ \frac{1}{2} k_2 (\varphi_2 (l_3 + l_4) - \varphi_1 l_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 l_4^2 \varphi_2^2.$$

Используя уравнение Лагранжа 2-го рода, запишем дифференциальные уравнения движения данной системы

$$m\ddot{y} + k_1 y - k_1 (l_1 + l_2) \varphi_1 = 0$$
, (56)

$$J_{1}\ddot{\varphi}_{1} - k_{1}(l_{1} + l_{2})y + \\ -\varphi_{1}(k_{1}(l_{1} + l_{2})^{2} + k_{2}l_{2}^{2}) - k_{2}l_{2}(l_{3} + l_{4})\varphi_{2} = 0,$$

$$J_{2}\ddot{\varphi}_{2} + \varphi_{2}(k_{2}(l_{3} + l_{4})^{2} + k_{3}l_{4}^{2}) - \\ -k_{2}l_{2}(l_{3} + l_{4})\varphi_{1} = 0.$$
(57)

Структурная схема эквивалентной САУ для расчетной схемы, приведенной на рис.13, приведена на рис.14, а соответствующая ей структурная интерпретация в виде дуальной механической цепи показана на рис.15.

Если принять  $J_1\ddot{\varphi}_1 = 0$ ,  $J_2\ddot{\varphi}_2 = 0$ , то применяя алгоритм, использованный выше, выразим коэффициент приведенной жесткости

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{\left(l_{1} + l_{2}\right)^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{\left(l_{3} + l_{4}\right)^{2}}}{k_{1}\left(k_{2} + k_{3} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{\left(l_{3} + l_{4}\right)^{2}}\right) + k_{2}k_{3} \cdot \frac{l_{2}^{2}}{\left(l_{1} + l_{2}\right)^{2}} \cdot \frac{l_{4}^{2}}{\left(l_{3} + l_{4}\right)^{2}}} . (59)$$

Приняв 
$$i_1 = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$$
 и  $i_2 = \frac{l_4}{l_3 + l_4}$ , получаем

окончательное выражение для приведенного коэффициента жесткости системы:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}k_{3} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2}}{k_{1}(k_{2} + k_{3} \cdot i_{2}^{2}) + k_{2}k_{3} \cdot i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2}}.$$
 (60)

Подход может быть распространен на механическую колебательную содержащую п рычажных связей второго рода. В этом случае выражение, для коэффициента приведенной жесткости, примет вид:

Жи потенциальной энергии для схемы, 
$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}...}{k_{1}\left[k_{2}\left[...\left[k_{n}\left[k_{n-1}\left(k_{n}+k_{n+1}\cdot i_{n}^{2}\right)+k_{n}k_{n+1}\cdot i_{n-1}^{2}\cdot i_{n}^{2}\right]+\right]\right]+}$$

$$T = \frac{1}{2}m\dot{y}^{2} + \frac{1}{2}J_{1}\dot{\phi}_{1}^{2} + \frac{1}{2}J_{2}\dot{\phi}_{2}^{2}, \qquad (55) \qquad \Rightarrow \frac{....k_{4}\cdot\left(i_{1}^{2}\cdot i_{2}^{2}...i_{n}^{2}\right)}{+k_{n-1}k_{n}k_{n+1}\cdot i_{n-2}^{2}\cdot i_{n-1}^{2}\cdot i_{n}^{2}\right]...]+k_{2}k_{3}...k_{n+1}\cdot\left(i_{1}^{2}\cdot i_{2}^{2}...i_{n}^{2}\right)}.$$

$$(61)$$

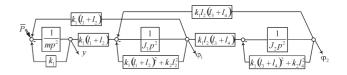


Рис.14. Структурная схема системы содержащей две рычажные связи второго рода.

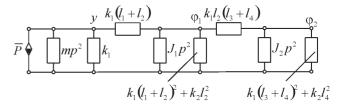


Рис.15. Дуальная механическая цепь системы, содержащей две рычажные связи первого рода.





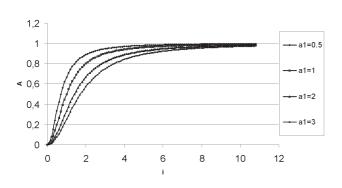


Рис. 16. Область возможных значений A, при постоянных a и изменении i.

**III.** Определение частот собственных колебаний и периода колебаний рассмотренных систем.

**3.1.** Механическая колебательная система, содержащая рычажную связь первого или второго рода.

Выражение для определения частоты собственных колебаний системы, приведенной на рис.1 и 10, с учетом (10), можно записать в виде:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k_1}{m} \cdot \frac{i^2}{\frac{k_1}{k_2} + i^2}} = \sqrt{\omega_{c_1} \cdot A}, \tag{62}$$

где  $A = \frac{i^2}{\frac{k_1}{k_2} + i^2} = \frac{i^2}{a_1 + i^2}$ , i может принимать зна-

чения: для рычагов первого рода  $i = \frac{l_2}{l_1}$ ; для ры-

чагов второго рода  $i = \frac{I_2}{I_1 + I_2}$ .

Задаваясь рядом числовых значений  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ , m, построим зависимости возможных значений коэффициента A, как это показано на рис.16 и 17.

Зависимости, приведенные на рис.16, обладают явными нелинейными свойствами, причем при увеличении а нелинейные свойства уменьшаются. Область построения можно условно разделить на три зоны: 1- зона резкого увеличения А при малых изменениях і; 2- зона равномерного изменения А при соответствующих изменениях і; В 3-ей зоне А асимптотический приближается к единице. При при постоянных і (рис.17) происходит заметное изменение А при малых а. В последующем, при изменении а происходит уменьше-

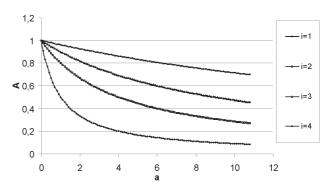


Рис. 17. Область возможных значений A, при постоянных i и изменении a.

ние А. Причем, при увеличении і, нелинейные свойства уменьшаются.

Выражение для периода собственных колебаний получим в виде:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k_1}{m} \cdot \frac{i^2}{k_2} + i^2}}.$$
 (63)

**3.2.** Механическая колебательная система, содержащая две рычажные связи первого или второго рода.

Выражение для определения частоты собственных колебаний системы, приведенной на рис.4 и 13, с учетом (24), можно записать в

$$\omega_{c} = \sqrt{\frac{k_{1}}{m} \cdot \frac{i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2}}{\left[\frac{k_{1}}{k_{2}} + \frac{k_{1}}{k_{2}} \cdot i_{2}^{2}\right] + i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2}}} = \sqrt{\omega_{c1} \cdot A} , \quad (64)$$

ΓΛ

$$A = \frac{i_1^2 \cdot i_2^2}{\left[\frac{k_1}{k_3} + \frac{k_1}{k_2} \cdot i_2^2\right] + i_1^2 \cdot i_2^2} = \frac{i_1^2 \cdot i_2^2}{\left[a_2 + a_1 \cdot i_2^2\right] + i_1^2 \cdot i_2^2},$$

 $i_1\,$  и  $i_2\,$  могут принимать значения: для рычагов первого рода  $i_1=\dfrac{l_2}{l_1}$ ,  $i_2=\dfrac{l_4}{l_3}$ ; для рычагов второго

рода 
$$i_1 = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$$
,  $i_2 = \frac{l_4}{l_3 + l_4}$ .

Выражение для периода собственных колебаний получим в виде:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k_1}{m} \cdot \frac{i_1^2 \cdot i_2^2}{\left[\frac{k_1}{k_2} + \frac{k_1}{k_2} \cdot i_2^2\right] + i_1^2 \cdot i_2^2}}}$$
 (65)





**3.3.** Механическая колебательная система, содержащая три рычажные связи первого или второго рода.

Выражение для определения частоты собственных колебаний системы, запишем в виде:

$$\omega_{c} = \sqrt{\frac{k_{1}}{m} \cdot \frac{i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}}{\left[\frac{k_{1}}{k_{4}} + \frac{k_{1}}{k_{3}}i_{3}^{2} + \frac{k_{1}}{k_{2}} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}\right] + i_{1}^{2} \cdot i_{2}^{2} \cdot i_{3}^{2}}} = \sqrt{\omega_{c_{1}} \cdot A}, \quad (66)$$

где -

$$\begin{split} A = & \frac{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2}{\left[\frac{k_1}{k_4} + \frac{k_1}{k_3} \cdot i_3^2 + \frac{k_1}{k_2} \cdot i_2^2 \cdot i_3^2\right] + i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2} = \\ = & \frac{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2}{\left[a_3 + a_2 \cdot i_3^2 + a_1 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2\right] + i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2} \end{split}$$

$$i_3 = \frac{l_6}{l_5 + l_6}.$$

Запишем выражение для периода собственных колебаний, используя (66):

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k_1}{m} \cdot \frac{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2}{\left[\frac{k_1}{k_4} + \frac{k_1}{k_3} i_3^2 + \frac{k_1}{k_2} \cdot i_2^2 \cdot i_3^2\right] + i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2}}$$
(67)

Полученные результаты можно распространить на системы с п рычажными связями. Тогда, выражение, позволяющее определить частоту собственных колебаний, для систем с п рычажными связями первого или второго рода, запишется в виде:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k_1}{m} \cdot A} = \sqrt{\omega_{c_1} \cdot A},\tag{68}$$

где

$$\begin{split} A &= \frac{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \ldots i_n^2}{\left[\frac{k_1}{k_{n+1}} + \frac{k_1}{k_n} i_n^2 + \frac{k_1}{k_{n-1}} \cdot i_{n-1}^2 \cdot i_n^2 + \ldots + \frac{k_1}{k_2} \cdot i_2^2 \cdot i_3^2 \cdot \ldots i_n^2\right] + i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \ldots i_n^2} = \\ &= \frac{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \ldots i_n^2}{\left[a_n + a_{n-1} \cdot i_n^2 + a_{n-2} \cdot i_{n-1}^2 \cdot i_n^2 + \ldots + a_1 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2 \cdot \ldots i_n^2\right] + i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \ldots i_n^2} \;, \end{split}$$

 $i_{\scriptscriptstyle 1}$  ,  $i_{\scriptscriptstyle 2}$  ...  $i_{\scriptscriptstyle n}$  передаточный коэффициент для рычагов первого и второго рода.

Используя (55), получим выражение для периода собственных колебаний системы, имеющей п рычажных связей первого или второго рода, в виде:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k_1}{m} \cdot A}}.$$
 (69)

Выводы по статье:

- 1. При введении рычажных соединений происходит уменьшение резонансной частоты и соответственно уменьшение периода колебаний системы.
- 2. Рычажные соотношения имеют одинаковую форму как для рычагов первого, так и второго рода.
- 3. На основе введения рычажных связей появляется возможность создания управляемых гасителей колебании, действующих путем изменения количества рычажных связей и длин плеч каждой из них.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- Елисеев С.В., Засядко А.А., Упырь Р.Ю. Новый подход в оценке возможностей последовательного соединения элементов в структурных интерпретациях механических колебательных систем// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС.- 2007.№1(13).- С.88-99.
- 2. Драч М.А. Динамический синтез и моделирование в задачах оценки и изменения вибрационного состояния крутильных колебательных систем// Автореф.канд.диссертации.- ИрГУПС.-2006.-24с.
- 3. Димов А.В., Елисеев С.В., Хоменко А.П. Обобщение задач виброзащиты и виброизоляции на основе структурных методов математического моделирования// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС.- 2006.№2(10).- С.6-17.
- Иванов Б.Г. Разработка методов расчета динамики и прочности агрегатов транспортной техники с рычажно-шарнирными кинематическими связями// Автореф. докт.диссертации. - СамГУПС. - 2007. - 48c.





Тирский О.Н., Быкова Н.М., Мироманов И.А., Хрюкин Ю.А.

УДК 624.19.551.248

# ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЛАСТОВ В ЗАОБДЕЛОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ТОННЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Долговечность тоннельных обделок, состояние бетонов основания железнодорожного пути при небалластном решении во многом определяются эффективностью работы дренажной системы. На участках, нуждающихся в осушении, рекомендуется дополнительно дренировать грунтовые воды. Но при этом следует определять направление и мощность водоносных слоев. Беспорядочный дренаж может привести к обратному эффекту — развитию структур водных путей и созданию водонасыщенной среды вокруг тоннеля.

Поиск, обнаружение или выделение водонасыщенных горных пород (пластов, слоев, зон и др.) в разрезе решается методами электроразведки.

Горная порода является многофазовой системой, состоящей из твердой фазы (минерального скелета) и порового пространства, заполненного водой. Поэтому водонасыщенные зоны или пласты представляют собой рыхлую, сыпучую, пористую, кавернозную или трещиноватую горную породу, при этом поры и трещины, как правило, сообщаются между собой [1]. Подземная вода, двигаясь по порам и трещинам, особенно, в разломных зонах обогащается различными солями, а это, в свою очередь, приводит к понижению ее удельного электрического сопротивления, чем больше содержание солей в воде, тем меньше ее удельное электрическое сопротивление.

Минеральный скелет или минеральная основа водонасыщенных пород характеризуется относительно высоким удельным электрическим сопротивлением, а вода, заполняющая трещинное или поровое пространство, обладает низким сопротивлением. Общее же удельное электрическое сопротивление водонасыщенного слоя будет опре-

деляться коэффициентом пористости или трещиноватости, коэффициентом влажности или влагоемкости и удельным электрическим сопротивлением воды. Влагоемкость горных пород - это способность принимать, вмещать и удерживать определенное количество воды. Наибольшей влагоемкостью и водоотдачей обладают крупнообломочные породы. Поскольку подземная вода имеет низкое удельное электрическое сопротивление, то водонасыщенные породы тоже характеризуются низким сопротивлением. Причем установлена закономерность – чем больше коэффициенты пористости, трещиноватости и влагоемкости, тем меньше удельное электрическое сопротивление этих пород.

По данным гидрогеологических исследований, проведенных в 2003 году, минерализация подземных вод в Северо-Муйском тоннеле составляет 1.5-2.5 г/л. Используя известные зависимости удельного электрического сопротивления воды от содержания различных солей в ней, было установлено, что сопротивление подземных вод с такой минерализацией может составлять  $1-2 \, \text{Ом}^* \text{м}$ . Поэтому, можно с уверенностью констатировать, что водонасыщенные зоны в Северо-Муйском тоннеле будут выделяться пониженным удельным электрическим сопротивлением среди сухих или слабо насыщенных пород.

Исходя из вышеизложенного, в качестве эффективного способа выделения водонасыщенных горных пород может быть применение методов электроразведки с определением электрического сопротивления. В электроразведке для поисков водонасыщенных горных пород существует несколько групп методов определения сопротивления. Одна группа методов, получившая название





методов электрического зондирования, предназначена для изучения разреза, в котором водонасыщенные породы залегают параллельно поверхности наблюдения. Вторая группа методов, называемая методами электрического профилирования, используется для изучения разреза, в котором водонасыщенные породы располагаются перпендикулярно или наклонно к плоскости наблюдения [2]. Поскольку по геологическим данным известно, что на намеченном для исследования участке тоннеля, горные породы имеют залегание приблизительно перпендикулярное оси или стенкам тоннеля, то были выбраны методы профилирования. Из группы методов электрического профилирования был выделен метод симметричного электрического профилирования (СЭП), как наиболее простой, менее трудоемкий и более эффективный в специфических условиях тоннеля.

Использовать стандартное оборудования СЭП для выполнения работ в тоннеле, где все стены забетонированы, не представляется возможным. Поэтому были разработаны специальные электроды, позволяющие осуществлять хорошее заземление.

Объект исследования — обделка тоннеля в горном массиве рассматривается в виде модели двухслойной среды, первым слоем которой является бетон обделки, толщиной не более 0, 6 м в стенах и своде и около 1,5 м в нижней части обделки, а второй слой — горные породы, залегающие перпендикулярно первому слою - бетону обделки. Среди горных пород, находящихся за слоем бетона необходимо выделить водонасыщенные пласты. Исходя из рассмотренной модели изучаемого объекта, была выбрана длина установки СЭП, равная 20 м., что позволяет изучать разрез на глубину до 5 м.

По результатам симметричного электропрофилирования можно выделить водонасыщенные пласты, определить их местоположение и мощность. Определение движения (фильтрации) вод в этих зонах и их направленности по данным СЭП не представляется возможным.

Для получения большей информации о водонасыщенных горных породах широко используют еще один электроразведочный метод — метод естественного электрического поля (ЕП), который в комплексе с электрическим профилированием в благоприятных условиях позволит подтвердить наличие

водоносных зон, а также установить и определить направление фильтрации подземных вод.

При фильтрации подземных вод в породах образуется так называемый фильтрационный потенциал ΔU. Наиболее сильно он проявляется в условиях горного рельефа. Величина градиента фильтрационного потенциала  $\Delta U$  различна в разных условиях и зависит от многих факторов, таких как скорости движения подземных вод, их минерализации, мощности, размеров, глубины проявления подземного потока и других факторов. Но установлено, что места, от которых вода фильтруется, характеризуются отрицательными потенциалами, а места, куда вода поступает, положительными, то есть по направлению движения воды наблюдается повышение фильтрационного потенциала [3]. Учитывая сложную картину зависимости фильтрационного потенциала ( $\Delta U$ ) от многих факторов, метод естественного электрического поля (ЕП) выполняется в комплексе с другими геофизическими методами. С учетом специфических условий работы (бетон - грунт) разработаны специальные заземлители.

Геофизические работы с применением электроразведки с целью определения границ водонасыщенных пластов были выполнены на восточном участке Северо - Муйского тоннеля между ПК  $42+00 - \Pi K 48+00$ . Наблюдения методами СЭП и ЕП проведены по трем линиям или профилям. Два профиля проходили по противоположным стенам обделки на высоте одного метра от железнодорожного пути, третий профиль располагался по железнодорожному пути посередине между рельсами. Шаг наблюдения или расстояние между точками, на которых выполнялись измерения ρ и ΔU, равнялся 5 метрам. Для измерения удельного электрического сопротивления и естественного электрического поля использовался стандартный прибор АЭ -72.

В качестве примера полученных результатов СЭП и ЕП приведены графики удельного сопротивления по левой стене обделки  $\rho_{\kappa}$  (Ом\*м) СЭП (рис. 1) и график  $\Delta$ U (мВ) ЕП (рис. 2).

Анализируя приведенные графики, можно четко выделить три типа горных пород. Первый тип пород характеризуется относительно высоким сопротивлением (200 — 350 Ом\*м), расположенный в интервале ПК 46 + 80 — ПК 47 + 30 (рис. 1). Этот же интервал на гра-





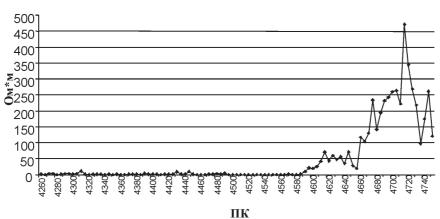


Рис. 1. График ск (СЭП) по левой стене.

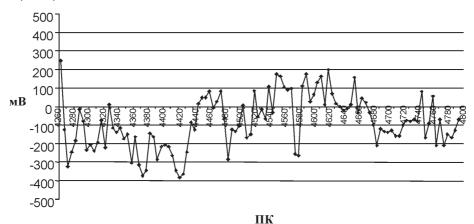


Рис. 2. График ДU (ЕП) по левой стене.

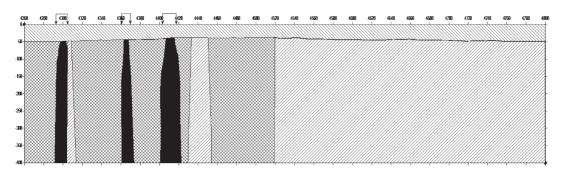


Рис. 3. Схематичный разрез по левой стене.

фиках  $\Delta U$  ЕП (рис. 2) характеризуются относительно спокойным отрицательным (-100 мВ) полем. Вероятно это породы слабой трещиноватости и с низкой влажностью (рис. 3).

Второй тип пород выделяется на графике СЭП пониженным удельным электрическим сопротивлением ( $20-200~{\rm Om^{\star}m}$ ). Это интервал ПК 45+80 - ПК 46+80 (рис. 1).

Третий тип пород характеризуется низким удельным электрическим сопротивлением (единицы и десятые доли  $Om^*m$ ). Это интервал от ПК 45+80 до ПК 42+60 и далее на запад. График ЕП в этом интервале имеет изрезанный характер с большим градиентом изме-

нений от -400 до +200 мВ (рис. 2), что может быть связано с многочисленными горизонтальными переливами воды и наличием пород с большей или меньшей трещиноватистью и обводненностью. При этом ориентировочно выделяются два интервала с разными значениями величины естественного электрического поля. Один интервал характеризуется в среднем положительными значениями  $\Delta U$  до +100 мВ (ПК 45+80-44+40), а второй интервал (ПК 44+40-42+80) характеризуется отрицательными значениями  $\Delta U$  до -400 мВ. Это, вероятнее всего, связано с движением воды за обделкой вдоль тоннеля от ПК 42+80





- ПК 44 + 40 в сторону ПК 44 + 60. Практически горные породы всего этого интервала тоннеля имеют сильную трещиноватость и обводненность (рис.4). Но надо отметить, что этот интервал не однороден. Здесь встречаются зоны, как с пониженной трещиноватостью и, следовательно, пониженной щенностью, так и наоборот. Однако все эти зоны по данным СЭП и ЕП выделяются менее уверенно. Необходимо отметить, что измеряемая величина удельного сопротивления зависит не только от сопротивления горных пород, но и от сопротивления бетона, что требует необходимых корректировок для уточнения результатов измерений, определяемых дополнительными исследованиями.

С целью определения направления фильтрации воды за обделкой тоннеля в вертикальном направлении были выполнены измерения потенциала ЕП на отдельных пикетах (ПК 48+00, ПК 45+80 и ПК 43+60) по ли-

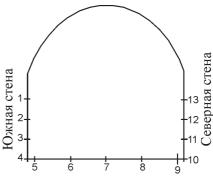


Рис 4. Схема расположения точек измерения на стенках тоннеля.

ниям, перпендикулярным тоннелю. Измерения  $\Delta U$  проводились в трех точках по южной и северной стенкам (на высоте 1,2 и 3 метра) и в пяти точках по бетону обратного свода (рис.4). Результаты, представленные в виде графиков  $\Delta U$  ЕП, (рис. 5), показывают, что на ПК 48+00 и ПК 43+60 потенциал увеличивается от верхней части стенок тоннеля к его основанию. Это может объясняться наличием движения

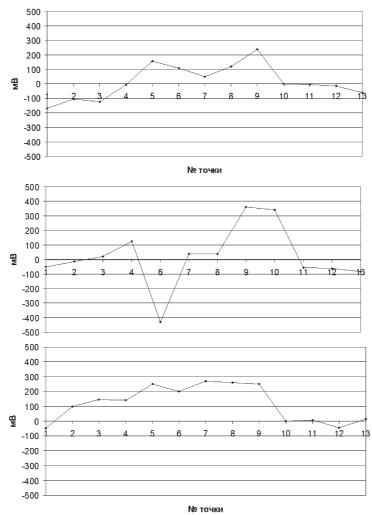


Рис 5. Графики  $\Delta U$  (ЕП) перпендикулярно оси тоннеля в сечениях сверху вниз на ПК 48+00, 45+80, 43+60.





воды сверху вниз. На ПК 45+80 картина более сложная, что может быть вызвана как вертикальным, так и горизонтальным движением воды.

Для подтверждения эффективности методов СЭП и ЕП по выделению водонасышенных горных пород за бетонным сводом были выполнены работы на восточном участке ПК  $27 + 00 - \Pi K 28 + 00$ . В период измерений на ПК 27+35 из специальной камеры вверх была пробурена скважина с целью осушения горных пород. Из пробуренной скважины пошла вода вместе с раздробленной, измельченной породой в виде песка, дресвы, глинистых частиц и прочее. Такой породы было вынесено из скважины не один кубометр. Следовательно, на  $\Pi K 27 + 35$  достоверно известно наличие рыхлых водонасышенных пород. На этом участке были выполнены работы методами СЭП и ЕП. Анализируя графики  $\rho_{\nu}$  (рис. 6) по этому участку, можно уверенно выделить обводненные породы по очень низкому сопротивлению (порядка 1 Ом\*м). Это породы, залегающие в интервале  $\Pi K 27 + 05 - \Pi K$ 27 + 50 по левой стене, где была пробурена скважина. График ΔU ЕП (рис. 7) на этом участке носят изре-

занный характер, что может быть объяснено наличием фильтрующихся вод. При этом на графике  $\Delta U$  в районе ПК 27+35- ПК 27+50 наблюдается увеличение потенциала на 200 и более мВ, что, возможно, связано течением воды вдоль тоннеля в эту зону.

В заключение можно отметить, что методы СЭП и ЕП позволяют выделять водонасыщенные породы, но для более детального изучения с целью уточнения результатов необходимо проводить дополнительные исследования.

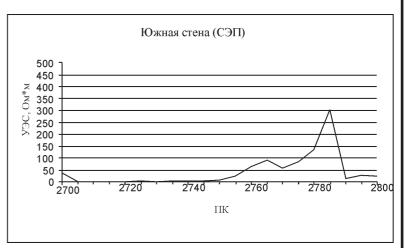


Рис. 6. График ск (СЭП) по правой стене.



Рис. 7. График ДU (ЕП) по правой стене.

### **ВИФАЧТОИЛАНЯ**

- 1. Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных: М.:Тверь АИС, 2005. 392 с.
- 2. Электроразведка: Справочник геофизика: М.: Недра, 1979. 518 с.
- 3. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля:  $\Lambda$ .: Недра, 1974. 307 с.





Ванчиков В.Ц., Холмогоров И.В.

УДК 620.22

### СДВИГОВАЯ ПРОЧНОСТЬ ГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЖИДКОСТИ ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКИ

Введение. Механические свойства связаны общими закономерностями строения тел из элементарных частиц, характеристиками их молекулярных взаимодействий и особенностями их теплового движения. Исследование механических свойств материалов имеет наибольшее практическое значение. Однако сложности, возникающие тогда, когда огромное число молекул твердого материала связаны воедино, настолько велики, что большая часть исследований твердого состояния тел была выполнена после 1945 г. Технически актуальные задачи не были правильно поставлены, отсутствовали физические представления о существе процессов деформирования и разрушения, с одной стороны, и структурообразования, с другой. Не выдвигалась проблема об установлении общих закономерностей. Отсутствие физических представлений о существе и механизме указанных процессов привело к формализму: исследование подменялось собиранием эмпирических сведений и во многих случаях служили подтверждением устаревших представлений.

С технологической точки зрения разница между твердыми телами и жидкостями весьма значительна. С точки зрения физики деформации и текучести вещества между жидкостями и твердыми телами имеется скорее количественное, чем качественное различие; это положение можем проверить, если примем во внимание аналогию между медленным течением вязкой жидкости и деформациями несжимаемой среды. При этом скорость вязкой жидкости аналогична упругому перемещению, скорость деформации — упругой деформации и коэффициент динамической вязкости - модулю сдвига. Эта аналогия позволяет сводить задачи упругости к задачам ламинарного вязкого течения (или установившейся ползучести) [1].

Исследования в области материаловедения, проводимые в наноразмерном диапазоне,

относятся нанотехнологии. Напомним, что нанотехнология позволяет работать на молекулярном уровне для создания больших структур с совершенно новой молекулярной организацией. Такие структуры размером 1 -100 нм (наночастицы) имеют свойства, которые существенно отличаются от свойств отдельных изолированных молекул и от свойств частиц вещества размером больше 100 нм. Наноматериалы представляют собой искусственно или естественно упорядоченную систему базовых элементов с нанометрическими размерами, обеспечивающие возникновение у материалов ранее неизвестных механических, химических, электрофизических и других свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов; т.е. процессы структурного упорядочения или самоупорядочения наноразмерных фрагментов вещества в наносистемы сопровождается возникновением у материала новых свойств, проявляющихся в виде квантово-размерных, синергетически-кооперативных и других эффектов. Использование характерных особенностей веществ на расстояниях порядка нанометров создает дополнительные, совершенно новые возможности реализации технологических приемов, связанных с материаловедением, механикой и многими другими областями науки. Наноструктуры позволяют изготавливать новые материалы с повышенными функциональными характеристиками. «Кирпичиками» для создания наноструктурированных материалов служат атомы неорганических элементов, молекулы биологической природы, например нуклеиновые кислоты. Следовательно, нанотехнология относится к микроскопическому миру, законы которого определяются механикой атомов и молекул, из-за чего протекающие там явления теряют наглядность и очевидность. Кроме того, по мере приближения размеров технологических объектов к одному мкм в них начинают





проявляться квантово-механические свойства вещества.

В нанотехнологии существуют два принципиально разных подхода к обработке вещества. Эти подходы принято условно натехнологиями зывать «сверху-вниз» «снизу-вверх». При подходе «сверху-вниз» минимальный размер элемента ограничивается длиной волны лазерного излучателя. Самые короткие длины волны лазерного излучения позволяют осуществить микрообработку с точностью до 100 нм. Иными словами, лазерный излучатель не пригоден для осуществления микрообработки элементов с размерами порядка от 1 до 100 нм. Более того, эта технология является сложной и требует дорогого оборудования; поэтому она малопригодна для организации эффективного крупносерийного производства.

Обобщение разрозненных теоретических и экспериментальных данных, полученных при исследовании свойств материалов в наноразмерном диапазоне, с единых позиций, их анализ и систематизация весьма актуальна с точки зрения перспективы развития теории адгезии жидкости при обтекании поверхности твердого тела. Развитие этой теории может изменить эффективность существующих технологических процессов «снизу-вверх», используемых в нанотехнологии.

Целью работы является исследование сдвиговой прочности граничного слоя, возникающей под действием сил адгезии жидкости, протекающей вблизи поверхности твердого тела в наноразмерном расстоянии.

Постановка задачи. Прогресс в области материаловедении требует фундаментальных исследований в области адгезионного взаимодействия веществ на атомарно- молекулярном уровне и существенного «прорыва» к новым принципам работы и новым технологическим приемам. Такой прорыв может быть осуществлен за счет детального исследования физики процессов адгезии жидкости, наблюдаемых при обтекании поверхности твердого тела. Например, исследованию свойств жидкости, которыми сопровождается адгезия молекул неподвижного граничного слоя жидкости и ламинарного потока в случае облитерации капилляра и фильтрационного эффекта в пористых телах, посвящены теоретические и экспериментальные работы как у нас в России, так и за рубежом. Тем не менее эта проблема далека от решения. Механизм самоформирования множества молекулярных граничных слоев, обладающей сдвиговой прочностью, остается не ясным до сих пор. На пути выяснения природы этого явления пройден лишь начальный этап. Обнаруженный нами особый вид ламинарного течения жидкости при числе Рейнольдса, равном 6,3, подтверждает наличие пробелов в представлениях о поведении жидкости, протекающей вблизи поверхности твердого тела в наноразмерном расстоянии [2].

В работах [3,4] приведены результаты опытов, проведенные исследователями Вовк Г.П., Башта Т.М., Кичин И.Н., Погодаев Ф.Г., зависимости облитерации капилляра диаметра, от длины капилляра, от величины приложенного давления; при этом использовались различные жидкости. В результате этих работ, в частности, определено, что трансформаторное масло в процессе уменьшения поперечного сечения при облитерации может закрыть капилляр диаметром около 200 мкм; частично 300 мкм; а в капиллярах диаметром 400 мкм облитерация не наблюдается. В работах [4,6,7] показано, что вода при облитерации может закрыть капилляр диаметром около 200 мкм; т.е. образуются слои жидкости, способные находится неподвижно, несмотря смывающее усилие потока. Иными словами, при облитерации капилляра образуются полимолекулярные слои жидкости, обладающие сдвиговой прочностью.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что в процессе обтекания жидкости поверхности твердого тела под действием сил адгезии формируются неподвижные граничные слои жидкости толщиной около 100 мкм. Например, в случае облитерации капилляра водой образуются более трех миллионов триста тысяч неподвижных граничных слоев. Этот факт существенно отличается от гипотезы Ньютона об одном неподвижном слое жидкости на поверхности твердого тела. Очевидно, что после образования первичного монослоя жидкости последующие акты прилипания происходят уже между молекулами только жидкости монослоя и молекулами текущей жидкости т.е. возникает задача определения силы когезии жидких частиц ламинарного потока к неподвижному слою жидкости в случае облитерации капилляра. В работе [6] показан метод определения силы когезии молекул ламинарного потока к молекулам неподвижного граничного слоя жидкости. В результате чего





определено значение энергии связи молекулы воды, находящейся в потенциальной энергетической яме молекул, связанных силами притяжения Ван-дер-Ваальса, в неподвижном граничном слое жидкости, равное 0,059 эВ/молек (1,4 ккал/моль). Эта величина превышает энергию теплового движения молекулы воды при комнатной температуре, равной 0,038 эВ, но меньше энергии фазового перехода льда в жидкость, равной 0,062 эВ/молек. Установленное значение энергии связи обусловлено возникновением сдвиговой прочности у граничного слоя воды, что в свою очередь обусловлено упорядоченной ориентацией молекул воды касательным усилием гидродинамического давления в направлении потока и закрепления молекул воды в таком положении силами адгезии твердого тела. Упорядоченная ориентация молекул на «жидкой поверхности» неподвижного граничного слоя является одним из факторов когезии жидких частиц потока при облитерации капилляра. Кроме того, расчеты, проведенные в работе [2], показали, что временная граница перехода микропроцессов внутреннего трения в масштаб событий макропроцесса — облитерации капилляра имеет приблизительный интервал времени в один час.

Несмотря на большое количество экспериментальных данных, математическая постановка задачи отсутствует, так как исследуемые облитерация капилляра и фильтрационный эффект в пористых телах из-за микроскопического процесса прилипания молекул ламинарного потока к «поверхности» неподвижного граничного слоя настолько сложны, что для них до сих пор не создана удовлетворительная схематизация. Иными словами, исследование осложняется микроскопичностью -онгинь неподвижного гранично го слоя, а также отсутствием метода, посредством которого выявляется это изменение. Кроме того, неразличимость молекул ламинарного потока жидкости и молекул неподвижного граничного слоя не позволяет производить методом прямого измерения определить изменение толщины неподвижного граничного слоя.

Исходя из вышеизложенного интервала времени перехода микропроцессов внутреннего трения в макропроцесс облитерации капилляра, сформулируем задачу данной работы: определить когезию жидких частиц ламинарного потока к неподвижному граничному

слою жидкости, обусловленный возникновением сдвиговой прочности у граничного слоя в случае облитерации капилляра.

Увеличение толщины граничного слоя жидкости. Закрытие поперечного сечения капилляра в случае особого вида ламинарного течения (облитерация, наблюдаемая при  $\text{Re} \approx 6,3$ ) имеет линейную зависимость от времени (рис.). Если обозначим поперечное сечение капилляра до облитерации как  $pr_n^2$ , а при облитерации через  $pr_L^2$ , то в соответствии с работой [2] имеем

$$S_{nL}(t) = \frac{\pi}{\pi} \frac{r_L^2}{r_n^2},$$

где  $S_{nL}(t)$  — функция, определяющая уменьшение сечения капилляра в случае особого вида ламинарного течения. При облитерации радиус капилляра  $r_n$  с течением времени постепенно слой за слоем уменьшается на размер прилипших молекул  $\Delta r$ . Этот процесс можно представить так

$$S_{nL}(t) = r_L^2 / r_n^2 = (r_n - \Delta r)^2 / r_n^2 = (1 + \Delta r^2 / r_n^2) - 2 \Delta r / r_n,$$
 (1)

где  $(1+\Delta r^2/r_n^2)$  - выражает процессы до начала формирования первоначального неподвижного граничного слоя жидкости,  $2\Delta r/r_n$  - постоянная величина, характеризующая относительное уменьшение радиуса капилляра (вследствие адгезии молекул ламинарного по-

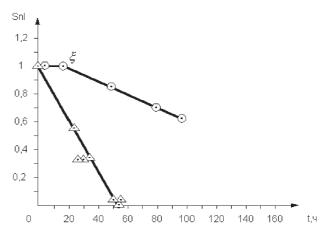


Рис. Зависимость изменения расхода жидкости от времени:

- о бидистиллированная вода, капилляр из пирексового стекла диаметром 124 мкм, длиной 5,2 см при перепаде давления 200 Па;
- $\Delta$  бидистиллированная вода, капилляр из нержавеющей стали диаметром 238 мкм, длиной 2,5 см при перепаде давления  $\,$  200 Па;
- $\xi$  начало облитерации капилляра.





тока жидкости к стенке капилляра) за 1 ч

Членом  $\Delta r^2 / r_n^2$  из-за весьма малой величины можно пренебречь.

Следовательно, выражение (1) принимает ВИД

$$S_{nL}(t) = 1 - 2\Delta r / r_n. \tag{2}$$

Вычислим изменение поперечного сечения с течением времени в случае облитерации капилляра

$$\int_{0}^{t_{\xi}} (2\Delta r / r_{n}) dt = (2\Delta r / r_{n}) t_{\xi},$$

где  $t_{\mathrm{\xi}}$  - отсчет времени облитерации капилляра, измеряемого в час. Обозначая увеличение  $(2\Delta r / r_n)$  за один час через  $\xi$ , получим

$$S_{nL} = 1 - \xi t_{\varepsilon}, \tag{3}$$

где  $S_{nL} = 1$  - выражает ламинарный режим течения жидкости в трубке, когда нет процесса увеличения толщины неподвижного граничного слоя;  $\xi t_{\scriptscriptstyle o}$  — процесс увеличения толщины неподвижного граничного слоя с течением времени. Когда  $\xi t_{\varepsilon}=0$ , то  $S_{nL}=1$ . Если  $\xi t_{\varepsilon}=1$ , то  $S_{nL}=0$  и прекращается течение жидкости через трубку.

Из выражения (3) можно вычислить 
$$\xi = \frac{1-S_{_{nL}}}{t_{_{\rm E}}}. \tag{4}$$

Полученные в (4) значения  $\xi$  даны в таблице 1.

Из двух серий опытов, приведенных в таблице, видим постоянство значений ξ для трубок, изготовленных из одного и того же материала, а также постоянство значений ξ от числа дистилляции воды. Из таблицы видно, что в случае течения бидистиллированной воды в капиллярах из пирексового стекла «склонность» к облитерации выше, чем у дистиллированной воды. При течении дистиллированной воды в капиллярах из молибденового стекла «склонность» к облитерации выше, чем у бидистиллированной воды; для капилляра из нержавеющей стали «склонность» к облитерации у дистиллированной воды выше, чем у бидистиллированной воды. При этом более всего способствует к облитерации нержавеющая сталь, затем молибденовое и пирексовое стекло. Эти данные согласуются с выводом работы [5] о том, что на поверхности стекла «склонность» к облитерации значительно снижается по сравнению с поверхностью нержавеющей стали.

Следует отметить, что в начальный период формирования неподвижного граничного слоя воды: при изменении расхода жидкости в пределах от 1,0 до 1,1 мкл/с  $\xi$  имеет меньшее значение, чем при изменении расхода от 1,1 до 1,6 мкл/с. Воздействие вибрации с амплитудой 0,004 мм на стенку капилляра уменьшают значение ξ. После образования первоначального неподвижного граничного слоя воды, который сформировался при расходе от 1,0 до

Табл. 1

N.T.	Относительное изменение толщины неподвижного граничного слоя $\xi$ , ч $^{\cdot 1}$							
№ серий опытов	Пирексовое стекло		Молибденовое стекло		Нержавеющая сталь			
	дистиллят	бидистиллят	дистиллят	бидистил- лят	дистиллят	бидистил- лят	тридис- тиллят	
1	0,003 0,0028 0,0029 0,0026	0,0037 0,0039 0,0035	0,0127 0,0132 0,0132	0,0104 0,0100 0,0100 0,0098		0,0183 0,0183 0,0200 0,0186	0,0533 0,0525	
2	0,0026 0,0030 0,0034	0,0039 0,0048 0,0050	0,013	0,0110 0,0109 0,0116 0,0100 0,0106 0,0144	0,0217 0,0204 0,0210 0,0214	0,0205 0,0203 0,0202	0,0382 0,0338 0,0365	





1,1 мкл/с, последующее изменение расхода до 1,6 мкл/с не изменяет значение  $\xi$  [4].

Далее, используя полученные значения  $\xi$ , оценим скорость нарастания толщины неподвижного граничного слоя  $\Delta r$  за один час. Из выражений (2) и (3) можно получить

$$\frac{\Delta r}{t_{E}} = \frac{\xi r_{n}}{2}.$$
 (5)

Подставляя значение  $\xi$  из таблицы в (5), полагая для простоты расчета  $r_n=100$  мкм, находим для  $\Delta r$ : пирексовое стекло, дистиллированная вода  $-1,5\cdot10^{-7}$  м; пирексовое стекло, бидистиллированная вода  $-2,0\cdot10^{-7}$  м; молибденовое стекло, дистиллированная вода  $-6,5\cdot10^{-7}$  м; молибденовое стекло, бидистиллированная вода  $-5,5\cdot10^{-7}$  м; нержавеющая сталь, дистиллированная вода  $-1,1\cdot10^{-6}$  м; нержавеющая сталь, бидистиллированная вода  $-9,5\cdot10^{-7}$  м; нержавеющая сталь, тридистиллированная вода  $-2,6\cdot10^{-6}$  м (см. табл.1: серия 1; 16 °C); нержавеющая сталь, тридистиллированная вода  $-1,8\cdot10^{-6}$  м (см. табл.1: серия 2; 30 °C).

Примем размер молекулы воды, примерно равным  ${\rm d}=3\cdot 10^{\cdot 10}$ . Вычисляя  $(\Delta r/t_\xi):d$ , получим число слоев, образованных за 1 ч. Согласно вышеприведенного расчета зависимости  $(\Delta r/t_\xi)$  от материала капилляра и от числа дистилляции воды, значения  $(\Delta r/t_\xi):d$  соответственно получаются: 500, 667, 2167, 1833, 3667, 3167, 8667, 6000 слоев/час. Последние два значения убеждают в том, что в воде, движу-

щейся по капиллярным трубкам, возможно существование кластеров воды размером около  $6\cdot 10^{\cdot 10} - 9\cdot 10^{\cdot 10}$  м в течение одной секунды.

Заключение. Самоформирование неподвижного граничного слоя жидкости толщиной около 100 мкм, наблюдаемый при ламинарном течении в зоне действия сил адгезии твердого тела, и обусловленный проявлением наномасштабных факторов, позволяет реализовать принцип послойной укладки микрочастиц на кристаллическую подложку для создания наноматериалов.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- 1. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. С. 37.
- 2. Ванчиков В.Ц. Микроскопические изменения в контактных системах // Вестник машиностроения. 2005. № 8. С.32-33.
- 3. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
- 4. Ванчиков В.Ц. Управление слоем трения в технологических процессах Иркутск: ИрГУПС, 2006. 172 с.
- 5. Башта Т.М. Самолетные и гидравлические приводы и агрегаты М.: Оборонгиз, 1951. 510 с.
- 6. Ванчиков В.Ц. Облитерационное явление в капиллярах устройств гидроавтоматики // Вестник машиностроения. 2006. № 1. С.88.
- 7. Ванчиков В.Ц. Метод определения сил когезии в вязком подслое // Вестник машиностроения. 2007. № 6. С.39-40.





Соболев В.И., Соболев И.В.

УДК 621.09.014

# КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ И СЛОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Основы сейсмической безопасности жилых зданий и промышленных сооружений закладываются на этапе проектирования или реконструкции.

При этом инженерный анализ и расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций при различных сочетаниях нагрузок выполняются при помощи компьютера с использованием специализированных программных средств, реализующих численные методы, основанные на дискретизации конструкций.

Можно назвать немногочисленные программные продукты, применяемые в расчетах строительных сооружений имеющие отечественную нормативную базу. Все они используют метод конечного элемента, в котором исходные уравнения математической физики сводятся в процессе решения к системе линейных разрешающих уравнений, составленных относительно конечного числа точек, дискретизирующих рассчитываемые области объектов.

Для реальных сооружений (см., например, рис.1), количество уравнений — размерность задачи достигает нескольких сот тысяч. В условиях сейсмической активности расчет на сейсмические воздействия осуществляется с помощью нормативно обусловленной спек-

тральной методики, в которой сейсмические воздействия заменяются некоторым статистически отфильтрованным спектральным отображением.

Для возможности использования такого отображения сейсмического воздействия система дифференциальных уравнений динамического равновесия приводится к независимым уравнениям. Это осуществляется путем замены исходного координатного базиса на нормальный, сформированный системой со-

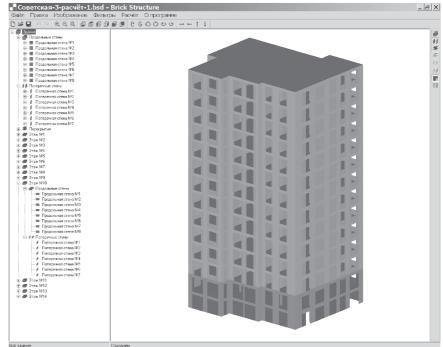


Рис.1. Модель проектируемого14-ти этажного жилого дома по ул. Советская. Общее количество КЭ всей модели 51443. Размерность задачи на собственные значения более трёхсот тысяч.





бственных векторов, определенных в результате решения проблемы собственных значений. Динамическая система, сформированная в таких координатах, в силу ортогональности базиса и несвязности уравнений, легко поддается упрощению путем прямого отбрасывания «ненужных» уравнений динамического равновесия.

Такая процедура упрощения исходной динамической системы осуществляется практически всегда за редким исключением простейших исходных моделей, поскольку хорошо известно, что требуемая размерность редко превышает десяти даже для обеспечения точности с большим запасом.

Такой способ упрощения достаточно хорош тем, что он формализован и не требует «ломать голову», учитывая геометрические и конструктивные особенности рассчитываемых сооружений при выборе расчетной схемы динамической модели.

Однако, отдавая на откуп формальным математическим методам процедуру упрощения динамической системы, в значительной степени жертвуем большими затратами времени на ее применение, поскольку решение даже частичной проблемы собственных значений для матриц такой размерности чрезвычайно затратно по времени и выливается в часы для решения задач средней размерности.

Не обсуждая проблемы «плохой обусловленности», «сгущения спектра» в высокочастотной части и некоторые другие, свойственные решению задачи определения собственных значений для матриц «большой» размерности, остановимся на факторе затрат расчетного времени.

С учетом того обстоятельства, что на подготовку исходных данных к расчету при использовании принятых технологий требуются недели или даже месяцы, такие затраты в практике проектирования приводят к тому, что осуществляются одновариантные поверочные расчеты предложенных конструктивных вариантов зданий или сооружений. На разработку следующих улучшенных вариантов и их согласование у конструктора, как правило, просто нет времени за исключением случаев проектирования особо ответственных объектов.

Возвращаясь к вопросу об уровне дискретизации параметров исходной континуальной модели, следует отметить, что на определен-

ном этапе подробность дискретизации оказывается излишней по той причине, что погрешность, привнесенная заданием механических параметров, многократно превышает погрешность дискретизации, для обеспечения которой в пределах практической потребности достаточно ограничиться не более чем десятью колебательными формами [1]. Ценность такой "находки" становится мизерной по отношению к десяткам или сотням тысяч узлов дискретной расчетной схемы, порождающих многочисленные проблемы в хранении, обработке и обеспечении точности при работе с матрицами большой размерности [2]. Кроме того, усложнение расчетной схемы связано с трудностями ее визуального контроля и увеличением вероятности ошибок, достаточно просто исключаемых при использовании "простых" расчетных схем.

Отдельной темы достойны вопросы, связанные с решением проблемы собственных значений для матриц больших размерностей, "страдающих" наличием паталогически близких или кратных собственных значений, что сопровождается значительными трудностями при их определении [3]. Поскольку свойство ортогональности колебательных форм, являющееся основой решения проблемы [3], специфично и характерно только для линейных систем, то представляется совершенно невозможным произвести оценку погрешности допущений практических расчетов, в которых к линейным относят все динамические модели зданий, возводимых в сейсмоактивных районах. Численные эксперименты показали, что увеличение размерности линеаризованной модели способно привести к увеличению погрешности [4,5]. Таким образом, увеличение размерности "загромождение" дискретной расчетной схемы может сопровождаться наслоением погрешностей и не способствовать уточнению модели, однако затрудняет возможности физической и интуитивной оценки результатов.

Если учесть то обстоятельство, что проектирование многоэтажных зданий в сейсмических районах требуют многовариантных расчетов, способных дать обоснованное конструктивное решение, то выбор расчетной схемы требует апробированных на практике компромиссных вариантов, учитывающих специфику конструкций и условия проектирования, время подготовки и решения задачи,





трудоемкость, достоверность и простоту оценки результатов.

Такой выбор вариантов расчетных схем реализован в авторском программном комплексе "БРИЗ", имеющем функции препроцессора и удобного в оперативной расчетной оценке вариантов конструктивного решения и эффективности средств сейсмозащиты. Существует возможность включения различных моделей устройств сейсмозащиты в модели с консольной расчетной схемой и схемой в виде перекрестного набора вертикальных и горизонтальных упругих элементов, реализованной ранее в программе "Деформа" [5].

Программный комплекс предназначен для расчета спектральным методом и методами численного интегрирования многоэтажных крупнопанельных и каркасных рамно-связевых зданий с диафрагмами и различным заполнением на сейсмические воздействия и ветровую пульсацию.

Особенностями программы является возможность учета основных форм колебаний конструкций здания, совмещенная с исключением излишне подробной дискретизации на этапе подготовке расчетной схемы. Таким образом, решается ряд проблем связанных с трудоемкостью подготовки данных, размерностью и ресурсоемкостью задачи. Преимущества составления исходных данных, обусловлены достаточной простотой подготовки расчетной схемы совмещенной с контролем полноты исходных данных. Осуществлен многофункциональный логический контроль исходной позволяющий произвести информации,

узкую локализацию области ошибочных или противоречивых данных. Алгоритм реализован посредством программировасистемы ния DELPHI-6. Реализована возможность совмещения описаний моделей рассчитываемой системы, как при помощи задания конструктивных параметров, так и посредством абстрактных параметров податливости, сформированных в виде матриц. Последнее обстоятельство позволяет использовать ранее просчитанные модели, облегчает возможность вариации расчетов и построения информационной базы проектов. Осуществлена возможность задания статистического эксцентриситета инерционных параметров в пространственной модели. Режим работы препроцессора позволяет осуществлять автоматизированную подготовку данных с конвертированием их в текстовый вид различных программных комплексов.

В разработанном авторами программном комплексе "BRIS" на этапе конечноэлементной генерации используются как угодно плотные - «подробные» конечноэлементные модели, формируемые по авторской технологии, которые на этапе подготовки динамических моделей (на этапе работы препроцессора) преобразуются в упрощенные модели «малой» размерности.

Особенность подготовки «подробных» конечноэлементных моделей – генерации сеток заключается в выделении и подготовке типовых блоков (см., например, рис. 2) с обеспечением возможности их гибкой сшивки в общей модели. Обеспечивается возможность вложенности таких блоков с обеспечением их иерархии, что существенным образом упрощает доступ к произвольному элементу или узлу модели, сокращает затраты времени на генерацию и легко позволяет осуществлять корректировку модели в процессе многовариантных расчетов.

Подготовка динамических моделей осуществляется на основе методов статической конденсации, реализуемых посредством суперэлементных преобразований исходной «подробной» конечноэлементной модели с

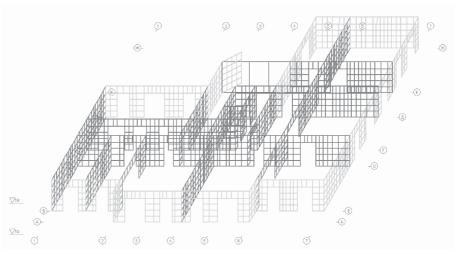


Рис.2. Фрагмент расчётной схемы 12-ти этажного жилого дома. Типовой этаж. Перекрытия не показаны.





формированием суперэлементных узлов в точках сосредоточения инерционных параметров. Отличительной особенностью формирования такой суперэлементной модели является возможность использования в качестве свойств условного суперэлементного узла некоторой комбинации свойств отдельных узлов исходной модели.

Наиболее простым вариантом такого подхода является обеспечение совместности узловых перемещений, в достаточной степени точности описывающей, например, перемещения точек диска перекрытия в его плоскости сравнительно с перемещениями точек другого диска [5]. В этом случае узлам с совмещенными перемещениями по некоторому направлению ставится в соответствие один узел. Расчетная схема динамической модели в этом случае может быть представлена в виде перекрестного набора вертикальных и горизонтальных упругих элементов в узлах пересечения которых сосредоточены инерционные параметры.

Такая расчетная схема, полученная на основе объединения перемещений узлов пересечения вертикальных и горизонтальных несущих элементов по направлению оси пересечения, предназначенная для расчета 14-ти этажного жилого дома, запроектированного для строительства на ул. Советская города Иркутска, изображена на рис. 3.

Перечисленные возможности программного комплекса "BRIS" позволяют выполнять многовариантные расчеты, осуществляемые в условиях ограничений, заданных на геометрические параметры планировочного решения, а также на геометрические и механические параметры несущих элементов сооружения. Попытки формализации процесса оптимизации с исключением вмешательства пользователя на этапе оценки результатов расчета очередного варианта и выбора изменений для формирования следующего не увенчались успехом. В настоящее время задействована процедура компьютерной подсказки вариантов улучшения конструктивного решения.

Преимущества использования изложенной технологии подготовки проекта приведены в примере, изложенном на рис. 4 — 7. Конечноэлементная аппроксимация исходного планировочного решения 14-ти этажного жилого дома, проектируемого для строительства на В результате расчета варианта здания с исходным планировочным решением получены

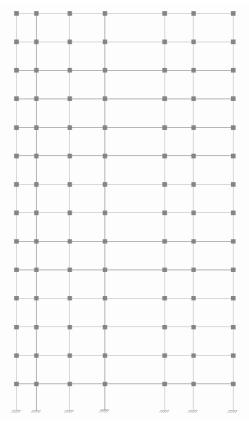


Рис.3. Упрощенная расчётная схема 14-ти этажного жилого дома.



Рис.4. Конечноэлементная модель14-ти этажного жилого дома.





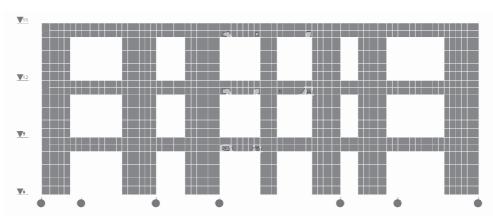


Рис.5. Интенсивность армирования наиболее нагруженной диафрагмы до процесса минимизации армирования.

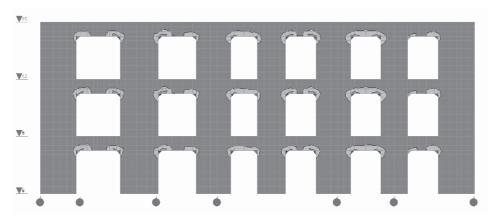


Рис.6. Интенсивность армирования наиболее нагруженной диафрагмы после процесса минимизации армирования в условиях планировочных ограничений.

большие величины главных растягивающих напряжений в окрестности угловых точек проемов отдельных диафрагм на уровнях этажей со второго по шестой. Максимальное значение нормального растягивающего напряжения достигает величины 11,3 Мпа. Интенсивность армирования, требуемого для обеспечения прочности перемычек этой диафрагмы (рис. 5) достигает значения 73 см²/м, что совершенно не реализуемо. На рис 5 показан участок между отметками 6-15(м) диафрагмы, требующий наиболее интенсивного армирования. Диафрагма расположена по оси Д плана здания. Области наиболее высокой интенсивности армирования расположены на перемычках в окрестности особых точек (вблизи угловых точек проемов) и выделены наиболее темным цветом. Для этого участка, как и для данного варианта конструктивного решения (исходного варианта) в целом характерна резкая концентрация напряжений вблизи угловых точек, проявляющаяся в картине интенсивности армирования.

Для улучшения конструктивного решения были просчитаны варианты с последовательным ужесточением диафрагм по осям 1,2. Выполнение этих мероприятий в сочетании с вутовым вариантом решения проемов привело к уменьшению требуемой интенсивности армирования до значения 17 см²/м (рис. 6).

Как видно из рисунка области наиболее интенсивных напряжений приобрели более распределенный характер, - преимущественно в окрестности нижних границ перемычек, при этом величины наибольших напряжений значительно снизились, что и отразилось на картине интенсивности армирования. Варианты планировочных решений до и после процесса минимизации приведены соответственно на рисунках 7 и 8.

Как видно из рисунков достижение поставленной цели потребовало ужесточентя диафрагм по осям 1,2,3 путем замены заполнений из легкого бетона на тяжелый железобетон. Заполнения на рисунках выделены наиболее темным цветом.





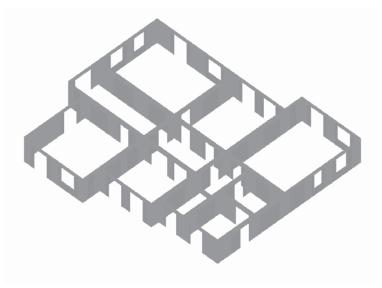


Рис.7. Планировочное решение до процесса минимизации.

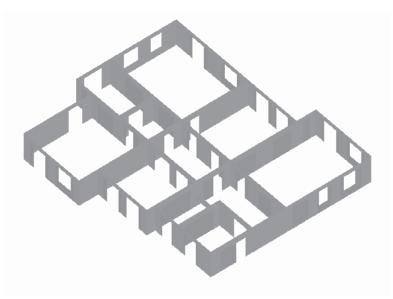


Рис.8. Планировочное решение после минимизации.

### **ВИФАЧЛОИЛЯНЯ**

- 1. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. М.: Стройиздат,1979. 319 с.
- 2. Писсанецки С. Технология разряженных матриц. М.: Мир, 1988. 410 с.
- 3. Parlett B., The symmetric eigenvalue problem. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1980, p. 383.
- 4. Соболев В.И. Дискретно-континуальные динамические системы и виброизоляция промышленных грохотов. Иркутск: Изд. ИрГТУ, 2002. 202 с.
- 5. 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.





Огар П.М., Горохов Д.Б., Ключев Е.А.

УДК 539.62; 621.646; 621.891

### ГЕРМЕТИЗИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЫКА ФРАКТАЛЬНЫХ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Контакт между двумя шероховатыми поверхностями обычно рассматривается как контакт эквивалентной, шероховатой поверхности и гладкой поверхности.

В связи с этим с помощью имитационного моделирования были проведены исследования, в результате которых установлено, что с относительной погрешностью, не превышающей 3%, значение фрактальной размерности эквивалентной, шероховатой поверхности определяется выражением

$$D = \frac{R_{\text{max}1}}{R_{\text{max}1} + R_{\text{max}2}} D_1 + \frac{R_{\text{max}2}}{R_{\text{max}1} + R_{\text{max}2}} D_2,$$

где  $D_1$  и  $D_2$  — фрактальные размерности контактактирующих поверхностей.

Значения G и  $\gamma$  эквивалентной шероховатой поверхности определялись с помощью разработанного авторами алгоритма [1].

Представляет практический интерес, как влияют фрактальная размерность и другие параметры фрактально-дискретной модели на эксплуатационные свойства деталей машин, например на герметичность уплотнительного стыка

Для оценки герметизирующей способности стыка в [2] был введен безразмерный параметр  $C_{\iota}$ , зависящий от параметров микрогеометрии и контактного давления

$$C_u = \frac{\Lambda^3 K_f V_k}{2\Pi^2 K_f},$$

где  $\Lambda$  - плотность зазоров в стыке;  $K_{_{\!f}}$  — коэффициент, учитывающий местные потери, обусловленные конструктивными элементами и местными преградами (для обеспечения запаса при определении герметичности его можно приравнять к единице);  $V_{_{\!K}}$  — вероятность возникновения утечки среды;  $\Pi$  = 2(1 –  $\eta$ ),  $\eta$  - относительная площадь контакта;  $K_{_{\!f}}$  - коэффициент извилистости.

Таким образом, герметизирующая способность уплотнительного стыка зависят от контактных характеристик — относительной площади контакта  $\eta$  и плотности зазоров  $\Lambda$ .

Для исследования влияния фрактальных параметров на контактные характеристики моделировались фрактальные шероховатые поверхности с разными фрактальными размерностями D и числом используемых гармоник n.

Зависимость  $\eta = \eta(F_q)$  определяется выражениями [1].

$$F_{q}(\varepsilon) = \frac{\frac{8}{3\pi} \int_{0}^{\min(\varepsilon, \varepsilon_{s})} \eta_{i}^{1,5} \varphi_{n}(u) du}{\int_{0}^{\min(\varepsilon, \varepsilon_{s})} \eta_{i}(u) \varphi_{n}(u) du}; \qquad (1)$$

$$\eta_{i} = \frac{\varepsilon - u}{2\omega} - F_{q} \left[ \left( 1 + \frac{1}{2} F_{q} \right) \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{\varepsilon - u}{2\omega \left( 1 + 0.5 F_{q} \right)^{2}}} \right) \right];$$

$$\Theta = \sum_{i=1}^{2} \frac{1 - v_{i}^{2}}{E_{i}}; F_{q} = \frac{q_{c} \Theta a_{c}}{\omega R_{\text{max}}};$$

$$\Phi_{n}(u) = \omega \sum_{k=0}^{n} \eta'(u - k\omega), \qquad n = \text{int}(\sqrt[n]{\omega}),$$

$$\eta(u) = \frac{B_{u}(\alpha, \beta)}{B(\alpha, \beta)};$$

$$\psi_{\eta}(\eta_{i}) = \frac{2}{\pi} \left[ \arcsin \eta_{i}^{0,5} - \sqrt{\eta_{i}(1 - \eta_{i})} \right];$$

$$\eta(\varepsilon) = \int_{0}^{\min(\varepsilon, \varepsilon_{s})} \eta_{i} \varphi_{n}(u) du_{n}$$
(2)

где  $q_c$  - контурное давление; u - относительный уровень;  $B(\alpha_i,\beta_i)$  - бета-функция;  $B_u(\alpha,\beta)$  - неполная бета-функция;  $\alpha,\beta$  - константы;  $E_i, \nu_i$  - модули упругости и коэффициенты Пуассона контактирующих поверхностей;  $A_c$  - контурная площадь;  $a_c, \omega, R_{\max}$  - параметры микрогеометрии.





Зависимость  $\eta = \eta(F_q)$  получаем исключением параметра  $\epsilon$  из уравнений (1) и (2). Плотность стыка

$$\Lambda(\varepsilon) = \int_{0}^{\min(\varepsilon, u_s)} \Lambda_{ri} \, \varphi / (u) du + \int_{\min(\varepsilon, u_s)}^{u_s} \Lambda_{oi} \, \varphi / (u) du,$$

$$\begin{split} &\Lambda_{oi} = \omega \left[ \frac{1}{2} - \frac{\varepsilon - u}{\omega} - 2F_q \left[ \left( k - 1 \right) - k_2 F_1 \left( -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 2; \frac{1}{k^2} \right) + \right. \\ &\left. + \frac{8}{3\pi} - 1 \right] \right], \\ &\Lambda_{ri} = \omega \left\{ \left( 1 - \eta_i \right) \left[ \frac{1 + \eta_i}{2} - \frac{\varepsilon - u}{\omega} - 2F_q \left( k - 1 \right) \right] + \right. \\ &\left. + 2F_q k \left[ \left. {}_2F_1 \left( -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 2; \frac{1}{k^2} \right) - \eta_{i-2} F_1 \left( -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 2; \frac{\eta_i}{k^2} \right) \right] - \right. \\ &\left. - 2F_q \left[ \frac{8}{3\pi} - \eta_{i-2} F_1 \left( -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 2; \eta_i \right) \right] + \right. \\ &\left. + F_{qi} \left[ 2 \, {}_2F_1 \left( -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \eta_i \right) - \frac{9\pi}{16} \, \eta_i^{0.5} \, \right] \right\}, \end{split}$$

где  $u_s$  — уровень насыщения вершин неровностей;  $\omega$  — средняя высота неровностей;  $F_1[a,b;c;x]$  — гиперболическая функция Гаусса;  $k=a_L \ / \ a_c$ .

Вероятность возникновения утечки

$$V_{k} = \begin{cases} x^{*}, & x^{*} > \frac{1}{3}; \\ 3^{k-1} (x^{*})^{3}, & x \leq \frac{1}{3}, \end{cases}$$

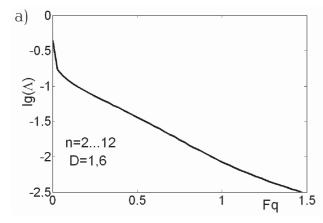


Рис.1. Зависимости  $\lg(\Lambda(F_a))$  – (a) и  $\lg(C_a(F_a))$  – (б).

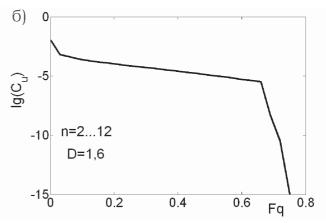
$$x^* = \int_0^{\varepsilon_x} x_i^* \varphi'_n(u) du, x_i^* = \begin{cases} 1, & \eta_i < \eta_i^*; \\ 0, & \eta_i > \eta_i^*; \end{cases}$$

В явном виде трудно определить зависимость  $C_u$  от контактных напряжений, поэтому следует аппроксимировать эту зависимость от  $F_a$  (рис.1).

Как показали вычислительные эксперименты при одинаковой нагрузке с ростом числа гармоник и с уменьшением фрактальной размерности, относительная площадь контакта уменьшается [1]. Также установлено, что с уменьшением фрактальной размерности требуется большее усилие для достижения одинакового объема межконтактного пространствал.

С ростом числа гармоник  $n_{\max}$  от 6 до 10 при  $n_{\min}=1$  усилие, необходимое для достижения одинаковых значений параметров  $\Lambda$  и  $C_u$  возрастает, затем при  $n_{\max}=12$  несколько уменьшается. Поэтому дальнейшее увеличение гармоник не имеет смысла. С запасом по герметичности расчет герметизирующей способности следует вести для  $n_{\min}=2$ ,  $n_{\max}=10$ .

Как следует из рис.2,в,г,д,е имеются три зоны герметизации: первая — зона начальной герметизации при  $0 < F_q \le 0,06$ , когда значение  $C_u$  меняется на порядок; вторая — зона стабильной герметизации при  $0,06 < F_q \le F_q^*$ ,  $F_q^* = 0,6...0,75$ , когда  $C_u$  меняется на два порядка; третья — зона эффективной герметизации при  $F_q = F_q^*$ , когда при незначительном увеличении  $F_q$  значение  $C_u$  может изменяться на несколько порядков.







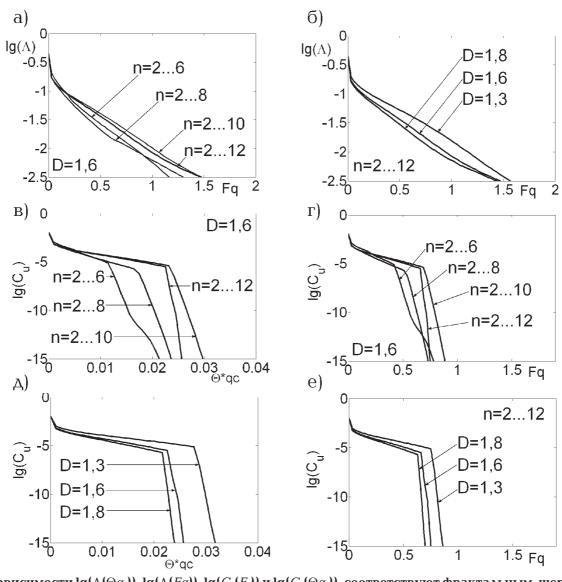


Рис.2. Зависимости  $\lg(\Lambda(\Theta q_c))$ ,  $\lg(\Lambda(Fq))$ ,  $\lg(C_u(F_q))$  и  $\lg(C_u(\Theta q_c))$ , соответствуют фрактальным, шероховатым поверхностям, приведенным в [1].

### БИБЛИОГРАФИЯ

- 1. Огар П.М., Горохов Д.Б., Глинов С.Н. Программный комплекс «FD Contact» для определения топологических и контактных характеристик фрактальных шеро-
- ховатых поверхностей. Межвуз. темат. сб. тр. Вып.11 / СПбГАСУ. СПб., 2005. 224с.
- Огар П.М., Корсак И.И. Влияние характеристик тяжелонагруженного стыка шероховатых поверхностей на герметичность.

   Братск: БрИИ, 1989.
   100с.
   Деп. в ВИНИТИ, №6109-В89.





Огар П.М., Ключев Е.А., Максимова О.В.

УДК 531.44

### УПРУГАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЛОИСТОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ

Задача определения напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела чрезвычайно важна в многих областях механики и решается, как правило, или с помощью интегральных преобразований, или с использованием численных методов конечных или граничных элементов [1]. В работах [2,3] для этой цели предложено использовать теорию Герца. Имея достоверные результаты для крайних значений толщины покрытия  $\delta = 0$ и  $\delta = \infty$ , и используя двухточечную аппроксимацию Паде, получены выражения для безразмерного упругогеометрического параметра, при помощи которых определяется упругая характеристика слоистого упругого тела и все основные контактные характеристики: размеры площадки контакта, максимальная осадка, распределение контактного давления. В работах [4,5] для определения упругой характеристики слоистого упругого полупространства при любой толщине применена жесткостная модель. Авторами установлено, что различие упругих характеристик полупространства, полученных при нагружении его давлением и сферическим герцевским индентором, не превышает 0,2%.

В этом случае, при определении упругой характеристики слоистой полуплоскости удобно применить нагружение ее герцевским давлением (рис.1)

$$p(\xi) = p_0 \sqrt{1 - \frac{\xi^2}{b^2}}$$

и воспользоваться подходом, предложенным в работах [4,5].

Перемещение точки О можно представить в виде суммы перемещений слоя  $\omega_{\delta}$  и основания  $\omega_{\sigma}$ 

$$\omega_0 = \omega_\delta + \omega_a 1$$

Схему (рис.1) можно представить в виде (рис.3а). Тогда перемещения

$$\omega_{\delta} = Pc_1, \quad \omega_a = Pc_2, \quad \omega_0 = P(c_1 + c_2), \tag{1}$$

где  $c_{\scriptscriptstyle 1}$  ,  $c_{\scriptscriptstyle 2}$  - жесткости слоя и основного материала.

Введем две однородных плоскости с упругими характеристиками  $\mu_1$ ,  $E_1$  и  $\mu_2$ ,  $E_2$ , нагруженных соответственно силами  $P_1$  и  $P_2$  (рис.2), которые выбираются из условия равенства перемещений  $\omega_\delta = \omega_1 = P_1 c_1$ ,  $\omega_a = \omega_2 = P_2 c_2$ .

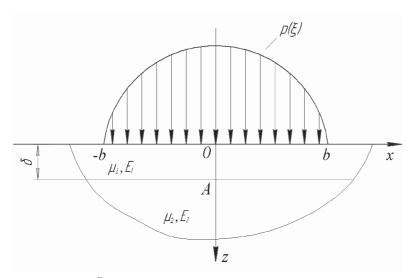


Рис.1. Схема нагружения слоистой полуплоскости.





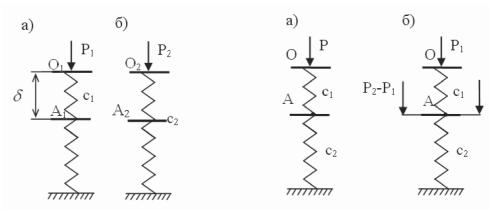


Рис.2. Схемы однородных полуплоскостей.

Рис. 3. Схемы нагружения слоистых полуплоскостей

Для определения перемещений по оси z однородной полуплоскости используем данные работы [6]

$$u_{1}(0,z,\xi) = -\frac{2}{\pi} \theta P \left[ \ln \sqrt{\frac{\xi^{2} + z^{2}}{\xi^{2} + h^{2}}} + \right] + \frac{1}{2(1-\mu)} \left( \frac{\xi^{2}}{\xi^{2} + z^{2}} - \frac{\xi}{\xi^{2} + h^{2}} \right) \right],$$

где  $\theta = {1-\mu^2 \choose E}$ , h - расстояние OH до точки H, относительно которой вычисляются перемещения. Суммарное перемещение по оси z от герцевской нагрузки

$$u_{2}(0,z) = -\frac{4\theta p_{0}}{\pi b} \int_{0}^{b} \left[ \left( b^{2} - \xi^{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \ln \sqrt{\frac{\xi^{2} + z^{2}}{\xi^{2} + h^{2}}} + \frac{1}{2(1 - \nu)} \left( \frac{\xi^{2}}{\xi^{2} + z^{2}} - \frac{\xi^{2}}{\xi^{2} + h^{2}} \right) \right] d\xi,$$

или

$$u_{z}(0,\bar{z}) = -\theta p_{0} b \left[ \ln \frac{\bar{z} + \sqrt{1 + \bar{z}^{2}}}{\bar{h} + \sqrt{1 + \bar{h}^{2}}} + \frac{\mu}{2(1 - \mu)} \times \left( \left( \bar{z} + \sqrt{1 + \bar{z}^{2}} \right)^{-2} - \left( \bar{h} + \sqrt{1 + \bar{h}^{2}} \right)^{-2} \right) \right],$$
(2)

где  $\bar{z} = \frac{z}{b}, h = \frac{h}{b}.$ 

Выражение (2) представим в виде  $u_z(0,\bar{z}) = u_z = \theta p_0 b K(\bar{z},\mu)$ ,

$$K(\bar{z},\mu) = -\left[\ln\frac{\bar{z} + \sqrt{1 + \bar{z}^2}}{\bar{h} + \sqrt{1 + \bar{h}^2}} + \frac{\mu}{2(1-\mu)} \left( \left(\bar{z} + \sqrt{1 + \bar{z}^2}\right)^{-2} - \left(\bar{h} + \sqrt{1 + \bar{h}^2}\right)^{-2} \right) \right].$$
(4)

Для схемы на рис.2а 
$$\omega_{\delta} = \omega_{01} - \omega_{A1} = u_{z01} - u_{zA1} = 0$$
$$= \theta_{1} p_{01} b \left[ K_{1} \left( 0, \mu_{1} \right) - K_{1} \left( \overline{\delta}, \mu_{1} \right) \right],$$

где  $\overline{\delta} = \frac{\delta}{\hbar}$ .

Упростим обозначения, приняв

$$K_i(0,\mu_i) = K_i(0), K_i(\overline{\delta},\mu_i) = K_i(\overline{\delta}),$$

тогда 
$$\omega_{\delta} = \theta_1 p_{01} b \left[ K_1(0) - K_1(\overline{\delta}) \right].$$

Для схемы на рис.2б

$$\omega_{A2} = u_{zA2} = \theta_2 p_{02} b K_2 (\overline{\delta}).$$

Жесткости, входящие в выражение (1), равны

$$c_1 = \frac{u_{z01} - u_{zA1}}{P_1}, \quad c_2 = \frac{u_{zA2}}{P_2}.$$
 (5)

Для схемы на рис.За

$$\omega_0 = \frac{P}{P_1} \left( u_{z01} - u_{zA1} \right) + \frac{P}{P_2} u_{zA2}.$$

Из эквивалентности схем нагружения на рис.За и рис.Зб следует

$$P = P_1 \frac{c_1}{c_1 + c_2} + P_2 \frac{c_2}{c_1 + c_2},$$

или

$$p_0 = p_{01} \frac{c_1}{c_1 + c_2} + p_{02} \frac{c_2}{c_1 + c_2}.$$
 (6)

Значение  $p_{01}$  определим из условия равенства перемещений при  $z=\delta$  слоистого тела под нагрузкой  $p_0$  и однородного материала под нагрузкой  $p_{01}$ :

$$\theta_{0} p_{0} b \left[ K_{0}(0) - K_{0}(\overline{\delta}) \right] = \theta p_{01} b \left[ K_{1}(0) - K(\overline{\delta}) \right],$$

$$p_{01} = \frac{\theta_{0}}{\theta_{1}} \frac{K_{0}(0) - K_{0}(\overline{\delta})}{K_{1}(0) - K_{1}(\overline{\delta})} p_{01}. \tag{7}$$

(3)





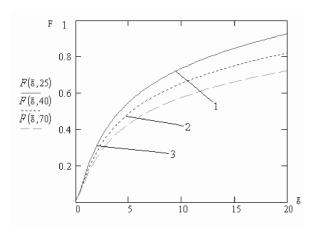


Рис.4 Зависимости  $F(\overline{\delta})$  при  $\overline{h}$  равном 25; 40; 70 (соответственно кривые 1, 2, 3)

Значение  $p_{02}$  определим из условия равенства перемещений при  $z = \delta$  слоистого тела под нагрузкой  $p_{\scriptscriptstyle 0}$  и однородного материала под нагрузкой  $p_{02}$ :

$$\theta_{0} p_{0} b K_{0}(\overline{\delta}) = \theta_{2} p_{02} b K_{2}(\overline{\delta}),$$

$$p_{02} = \frac{\theta_{0}}{\theta_{1}} \frac{K_{0}(\overline{\delta})}{K_{2}(\overline{\delta})} p_{0}.$$
(8)

Выражение (5) представим в виде:

$$c_{1} = \frac{2\theta_{1}}{\pi l} \left[ K_{1}(0) - K_{1}(\overline{\delta}) \right], \tag{9}$$

$$c_{2} = \frac{2\theta_{2}}{\pi l} K_{2}(\overline{\delta}) = \frac{2\theta_{1}}{\pi l} \frac{p_{01}}{p_{02}} K_{1}(\overline{\delta}), \tag{9}$$

где l - длина площадки нагружения.

С учетом выражений (7) и (8) имеем
$$c_2 = \frac{2\theta_2}{\pi l} \frac{K_0(0) - K_0(\overline{\delta})}{K_1(0) - K_1(\overline{\delta})} \frac{K_2(\overline{\delta})}{K_0(\overline{\delta})} K_1(\overline{\delta}) \quad (10)$$

Подставляя выражения (7), (8), (9), (10) в (6) получим

$$\theta_0 = \theta_1 F$$

$$F = \frac{1}{K_1(0)} \left[ \frac{\left( K_1(0) - K_1(\overline{\delta}) \right)^2}{K_0(0) - K_0(\overline{\delta})} + K_1(\overline{\delta}) \frac{K_2(\delta)}{K_0(\delta)} \frac{\theta_2}{\theta_1} \right]. (11)$$

При  $\delta$  = 0  $\theta$   $_{_0}$  =  $\theta$   $_{_2}$ , при  $\delta$  =  $\infty$   $\theta$   $_{_0}$  =  $\theta$   $_{_1}$ , т.е. для крайних значений толщины покрытия упругая характеристика соответствует однородному телу основания и покрытия.

Так как значения функции  $K(\bar{\delta},\mu)$  для  $\mu = 0,3...0,5$  изменяются незначительно, то с

большей степенью точности (погрешность менее 5%) можно принять

$$\mu_0 = \mu_1 - \frac{\mu_1 - \mu_2}{1 - \frac{\theta_2}{\theta_0}} F$$
, при  $\mu_1 > \mu_2$ ,  $E_1 < E_2$ ;

$$\mu_0 = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\theta_2/\theta_{-1}} F$$
, при  $\mu_1 < \mu_2$ ,  $E_1 > E_2$ ;

и решать уравнение (11) относительно F с начальным приближением

$$F_0 = F \big|_{\mu_0 = 0.5 \left(\mu_1 + \mu_2\right)}$$
 Из представленных зависимостей  $F\left(\overline{\delta}\right)$ 

следует, что они существенно зависят от относительного уровня отсчета  $h_0$ .

Полученная упругая характеристика  $\theta_0 = \theta_1 F$  слоистой полуплоскости в дальнейшем используется при расчетах напряженно-деформированного состояния полуплоскости как однородной.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- Кульчицкий Жигайло Р., Роговский Г. Растягивающие напряжения в твердом покрытии в двухмерной контактной задаче с учетом трения // Трение и износ, 2006, T.27, №1. C.33-42.
- Воронин Н.А. применение теории упругого контакта Герца к расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела // Трение и износ, 1993. т.14, №2. С.250-258.
- Воронин Н.А. Инженерный метод решения контактной задачи о взаимодействии цилиндрического штампа с упругим двухслойным полупространством // Трение и износ, 1994, т.15, №5. С.754-763.
- Огар П.М., Максимова О.В., Автушко А.Н., Устюжанин Е.В. К расчету напряженно деформированного состояния слоистого упругого тела / Труды Братского гос. у-та, Т.2. — Братск: БрГУ, 2006. С.297-302.
- ОгарП.М., Тарасов В.А., Ключев Е.А., Максимова О.В., Влияние толщины покрытия на упругую характеристику слоистого упругого полупространства / Механики XXI веку. Сб. докладов VI Всерос. научн.-техн. конф. - Братск: Бр $\Gamma$ У, 2007. C.322-327.
- Ишлинский А.Ю. Прикладные задачи механики. Кн.2. Механика упругих и абсолютно жестких тел. – М.: Наука, 1986.-416 c.





Четвертнова В. В.

УДК 625.1.033

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА РАБОТУ ПРОТЯЖЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОЗИЦИИ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Железнодорожный путь, являясь протяженным транспортным объектом, пересекает территории с резко отличающимися инженерно-геологическими условиями. Рассматривая в качестве примера Транссибирскую железнодорожную магистраль в пределах Восточной Сибири, можно отметить чередования зон различной тектонической активности. Современные подвижки в этих зонах фиксируются инструментальными методами, гидрогеохимическими аномалиями, методами спутниковой геодезии и т.п. [1] Вполне закономерно встает вопрос о взаимосвязи надежности железнодорожного пути с состоянием земляного полотна и его основания в зонах активных движений земной коры.

Взгляд на протяженный транспортный объект с позиции системного подхода позволяет проецировать открытия последний десятилетий в области геодинамики на его функционирование. Участки таких объектов, проходящие по зонам тектонических нарушений, определяются, как участки активных движений земной коры, а подвижки земной поверхности по отношению к работе протяженных транспортных объектов могут быть названы геодеформационными воздействиями.

Геологические исследования последних десятилетий показывают, что процессы, происходящие в земной коре и передающиеся на поверхность, значительно влияют на работу протяженных транспортных сооружений. В результате чего, наблюдаются смещения и повреждения конструкций трубопроводов, опор мостов, тоннелей, деформации земляного полотна железнодорожного пути, расстройства рельсовой колеи. Статистика показывает, что аварии на нефтегазовых объектах, оказавшихся в пределах геодинамических аномалий, часто повторяемы [2]. Исследования статистических рядов отказов железнодорожного пути Транссибирской магистрали за 100 лет эксплуатации подтверждают влияние современных подвижек в зонах активных движений земной коры на работу инженерных сооружений частотой деформаций земляного полотна, неисправностей верхнего строения пути и повреждений мостов и труб [3].

Земляное полотно, воспринимает статическую нагрузку от верхнего строения пути и динамическую - от подвижного состава, упруго передает ее на своё основание. Являясь фундаментом верхнего строения пути, земляное полотно служит для выравнивания земной поверхности в пределах железнодорожной трассы и придания пути необходимого плана и продольного профиля [4]. Основные требования к земляному полотну, особенности его расчетов и содержания сформулированы и приводятся в технической литературе [5, 6]. Проблемам земляного полотна посвящены работы Г.М. Шахунянца, В.П. Титова, Т.Г. Яковлевой, В.В. Виноградова, В.И. Грицыка и др. ученых. При этом «основание пути» представляется стабильным, а прохождение железнодорожного пути по слабым грунтам, в сложинженерно-геологических предусматривает дополнительную защиту. Современная транспортная наука теоретически позволяет добиться устойчивого земляного полотна и его основания при строгом соблюдении разработанных нормативов проектирования и эксплуатации. В тоже время в современных расчетах стабильность и устойчивость железнодорожного пути не связывается с геодеформационными воздействиями (за исключением сейсмически активных районов). Такой подход основан на представлении о Земле, как о статической среде горного производства, подземных сооружений и основания наземных инженерных сооружений. В действительности, тектонические нарушения





разломы и другие границы блоков земной коры обладают определенной подвижностью даже на территориях, спокойных с точки зрения сейсмичности. Эта подвижность проявляется в виде смещений блоков земной коры и их приповерхностных слоев и не учитывается в современных расчетах железнодорожного пути и нормах его проектирования [5, 6].

Проблема эксплуатационной надежности протяженных транспортных объектов не может быть решена с позиции узкой специализации, которая, при всей глубине знаний в от- Рис. 1. Система железнодорожного пути. дельных отраслях не позволяет создать целостную картину объекта исследования. Рассматривая

любой транспортный объект в виде сложной многоуровневой открытой системы, можно констатировать, что ее «непредсказуемость» в ряде случаев (аварии трубопроводов, сходы подвижного состава и так далее) может найти объяснения лишь с позиции системного подхода.

Системный подход в решении задачи эксплуатационной надежности железнодорожного пути требует, прежде всего, учета ряда дополнительных факторов, влияющих в реальных условиях на его работу. К таким факторам, учитывая значительную протяженность рассматриваемого объекта, можно отнести, фактор неоднородности геологической среды, фактор, отражающий сложность инженерно-геологических условий прохождения железной дороги. Выделение фактора «геодеформационного воздействия» и оценка его влияния на устойчивость основания пути и в целом на устойчивость и предсказуемость системы транспортного объекта в зонах активных движений земной коры, в полной мере отвечает принципам системного подхода.

На рис.1 представлена система железнодорожного пути, сформированная по результатам проведенной декомпозиции объекта исследования. В данном случае из области неуправляемых факторов предлагается выделить фактор «геодеформационные воздействия», который на определенных участках железнодорожного пути оказывает влияние на выходные параметры, и прежде всего, на уровень его надежности.



Системный подход позволяет в рамках подсистемы «основание пути» выделить системообразующий фактор, который, являясь относительно самостоятельной ступенью в структуре объекта, несет в себе информацию о ее целостности.

Связывая геодеформационные воздействия с надежностью, следует отметить, что надежность железнодорожного пути формируется непрерывно на всех этапах его существования.

На рис.2 представлена условная схема формирования и изменения надежности транспортной системы (на примере железнодорожного пути). При этом периодичность выполнения ремонтов исчисляется нормативной наработкой по тоннажу с учетом фактического состояния пути и грузонапряженности участка линии [7]. В эту схему не вписываются «всплески» неисправностей пути, приуроченные к участкам незначительной протяженности (100-500 м), несоразмеримой с длиной перегона. Для примера приведена таблица 1 «Неисправности пути на участке ст. Зима- ст. Ангарск ВСЖД», характеризующая частоту повторяемости отказов на отдельных пикетах выбранного направления Транссибирской магистрали. Отказы по причине неисправностей пути фиксируются в журналах предупреждений об ограничении скоростей. В таблице отражены отказы за период 1985-1996г.г. и выделены пикеты с повторяемостью отказов более трех раз.





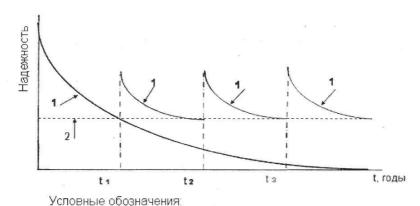
Табл. 1.

### Неисправности пути на участке ст. Зима- ст. Ангарск ВСЖД.

Станция	Грузонапряженость, млн. ткм/км в год I путь/П путь	Отказы (неисправности пути) местоположение / дата	
Ст. Зима		KM4934	
	37.9/75.6	ПК49597 1путь /1992;1993; 1993; ПК49597 2путь/ 1992; ПК49669 1путь/ 1993; 1993; 1995; ПК49669 2 путь /1992; ПК68688 1путь/ 1992; 1993; 1994; ПК68688 2 путь/1991; 1993; 1993,1994.	
Ст. Черемхово		KM 5054	
	36.8/55.4		
Ст. Касьяновка		KM 5066	
	38.7/59.1	ПК50965 1 путь /1995; 1995; ПК 50965 2 путь /1985; 1988; 1995 ПК 50985 1 путь / 1994; 1994; ПК 50985 2 путь / 1985; 1996; ПК 51250 1 путь/ 1986; 1994 ПК 51250 2 путь/1986; 1993; 1994; ПК51375 1 путь/1985; 1992; 1995; 1996 ПК51375 2путь / 1987; 1988; 1994; 1994; 1994; 1996; ПК51395 1 путь/1996 ПК51395 2путь / 1986; 1988; 1988; 1992; 1994	
Ст. Ангарск		KM 5143.7	

Резкое снижение надежности на фиксированных пикетах при регулярном проведении комплекса ремонтных работ, при отсутствии колебаний размеров пропущенного тоннажа на этих участках требует совершенствования информационной базы о районе прохождения железнодорожной линии. Характерно, что все участки с повторяющимися неисправностями железнодорожного пути

проходят по зонам с неустойчивой геодинамикой, согласно проведенного районирования железнодорожных трасс по признакам активного неотектогенеза [8]. Это подтверждает взаимосвязь надежности железнодорожного пути и состояния его «теоретически устойчивого» основания в зонах активных движений земной коры.



1- изменение надежности объекта в результате старения и износа;

Рис. 2. Условная схема формирования и изменения надежности транспортной системы.

<sup>2 -</sup> допустимый уровень надежности;

t<sub>1</sub> ... t<sub>n</sub> - сроки проведения ремонтов





Преимущество взгляда на объект исследования с позиций системного подхода позволяет расширить и углубить представления о взаимодействии элементов в системе. Совершенствование системы протяженного объекта на примере железнодорожного пути сводится не просто к расширению перечня входных факторов, а к созданию доказательной базы, позволяющей подтвердить их значимость.

В общем случае математическая модель изучаемого объекта исследования может быть представлена следующими отношениями, характеризующими взаимосвязь внешних, внутренних и выходных параметров

 $y=f(x,g),\,x\!\in\!R^{^k},\,g\!\in\!R^{^m}\,\,y\!\in\!R^{^n}$  где x,g,y- внешние, внутренние и выходные параметры, соответственно; f - векторная функция векторного аргумента;  $R^{^k},R^{^m},R^{^n}$  - области внешних, внутренних и выходных параметров.

Для исследуемого объекта могут быть выделены следующие параметры:

- внешние силовые воздействия от веса конструкций и поездов с учетом динамики и геодеформационных воздействий со стороны основания земляного полотна;
- внутренние свойства материалов земляного полотна и его основания, представленные плотностью (ρ), модулем упругости (Е) и коэффициентом Пуассона (ν) (приняты для изотропных материалов); геометрия объекта, отражающая варианты различных сочетаний параметров плана и продольного профиля железнодорожного пути;
- выходные данные нормальные и касательные напряжения, а также перемещения, характеризующие напряженно- деформированное состояние участка железнодорожного пути под воздействием внешних и внутренних факторов.

Оценка влияния выделенного внешнего фактора может быть проведена путем решения задачи установления закономерностей снижения устойчивости железнодорожного пути в зонах тектонических нарушений и выявления связей этих закономерностей с нор-

мами проектирования продольного профиля [9].

Решение данной задачи может осуществляться только на этапе синтеза системы. Созданная модель системы и база выходных данных многовариантных ее поведений при варьировании входными параметрами позволит решить проблему надежности железнодорожного пути через этап совершенствования нормативной базы, заложенной в проект железнодорожного пути.

### **ВИФАЧТОИЛАНЯ**

- 1. Касьянова Н.А., Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр и ее влияние на объекты нефтегазового комплекса. М: Геоинформмарк, 1996.-54с.
- 2. Кострюкова Н.К., Кострюков О.М., О повторяющейся аварийности и других негативных явлениях в связи с фактором природного риска современно-активными разломами земной коры. Горные науки на рубеже XXI века. Материалы международной конференции 1997 г., Екатеринбург, 1998г., С.439-444.
- 3. Быкова Н.М. Неотектонические движения земной коры и деформации дорожных сооружений. Иркутск: ИрИИТ, 1998. 136с.
- 4. Яковлева Т.Г. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева, Н.И. Карпущенко, СИ. Клинов, Н.Н. Путря, М.П. Смирнов. -М.Транспорт, 1999. 405с.
- 5. Строительно-технические нормы МПС РФ / Железные дороги колеи 1520 мм. СТНЦ-01-95//М: МПС РФ, 1995.
- 6. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520мм /СП-32-104-98. Свод правил по проектированию и строительству /Госстрой России. М.: ГУПЦПП, 1999. 90 с.
- 7. Положение о системе ведения путевого хозяйства на железных дорогах Российской федерации. МПС РФ. М., 2002.
- 8. Быкова Н.М., Дзюба А.А. Районирование железнодорожных трасс по признакам активности неотектогенеза / Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №4. 2001. С. 50 54.
- 9. Четвертнова В.В. К вопросу совершенствования норм проектирования железных дорог /В.В. Четвертнова // Научное обозрение. -2006.-№1.- С. 5-7.

# Министерство Образования и Науки Российской Федерации Министерство Транспорта Федеральное агентство железнодорожного транспорта Иркутский государственный университет путей сообщения Российская инженерная академия Современные технологии Системный анализ



Моде/лиров\ание

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





Махутов Н.А., Гаденин М.М.

УДК 621.311

# МНОГОУРОВНЕВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ

### 1. Постановка проблемы.

Возрастающая важность проблем обеспечения комплексной безопасности техносферы, повышения уровня технического регулирования и защищенности критически важных для национальной безопасности объектов инфраструктуры страны была определена рядом ской Федерации до 2010 года» (МЧС России), Федеральных законов и решениями совместного заседания Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации 13 ноября 2003 г. Протокол №4 этого заседания был научно-технических программ отраслей и реутвержден Президентом Российской Федерации 4 декабря 2003 г. Принципиальное значение при этом имеют Федеральные законы «О ти большой сети научно-производственных промышленной безопасности опасных производственных объектов», «О техническом регулировании», а также ряд других федеральных учно-исследовательских центров [8, 9]. Это по-

К настоящему времени в России и за рубежом выполнен значительный объем научных рены соответствующие требования к безопасисследований и прикладных разработок по ности — объекты технического регулировакомплексным проблемам обеспечения техно- ния (ОТР), опасные производственные объекгенной безопасности объектов инфраструкту- ты (ОПО) и критически важные объекты ры, населения и среды жизнедеятельности, а (КВО). также по подготовке и переподготовке специаности России», в энциклопедических изданиях Ираке, Югославии. МЧС России «Гражданская защита») [1-7].

новения аварий и катастроф природного и техногенного характера развивались в нашей стране с 1990 года в рамках Государственной научно-технической программы «Безопасность» [6], в ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Россий-«Национальная технологическая база» (Минобрнауки России). В последние годы проблемы безопасности получили свое отражение в ряде других Федеральных целевых программ, гионов. Реализация такой многоуровневой постановки проблемы способствует деятельносорганизаций и их объединений, а также высших технических учебных заведений и назволяет выделить для последующего анализа три группы объектов, для которых предусмот-

Вместе с тем в течение двух последних делистов по этим проблемам. Результаты этих сятилетий мир столкнулся с серией крупнейисследований и разработок отражены в Кон- ших за всю историю катастроф техногенного и цепции национальной безопасности Россий- природно-техногенного характера на ОПО и ской Федерации, в указанных выше Федераль- КВО (химические комплексы Севезо, Бхопал, ных законах (в том числе и в законах о защите АЭС ТМА и Чернобыль, РКК «Челленджер» и населения и территорий от чрезвычайных си- «Колумбия», транспортные системы под туаций природного и техногенного характера, Арзамасом и Уфой, АПЛ «Трэшер» «Комсомоо ядерной и радиационной безопасности, о бе- лец», «Курск», летательные аппараты «Боинг», зопасности гидротехнических сооружений, о «Антей», Ту-160, буровые платформы в транспортной безопасности, а также в фунда- Англии, морские суда в Эстонии, России, Япоментальных публикациях отечественных спе- нии). К этим катастрофам добавились несанциалистов (в том числе в многотомных энцик- кционированные и террористические возделопедических изданиях «Машиностроение», йствия на объекты инфраструктуры граждан-«Безопасность России» и «Природные опас- ского и военного назначения в США, России,

Реализация опасностей и угроз в природ-Научные основы анализа безопасности но-техногенной сфере на всех упомянутых технических объектов с учетом риска возник- выше типах объектов (ОТР, ОПО, КВО) стала





тысяч людей, нанесению увечий сотням тысяч Российской Федерации [7-8]. и загрязнению огромных территорий.

Эти данные показали, что все промышленно развитые страны и мировое сообщество объектов техносферы. оказались не в состоянии противостоять усилению опасностей, угроз и вызовов безопасности населения, объектов инфраструктуры и среды жизнедеятельности, несмотря на большие усилия по повышению требований к конструированию, технологическим процессам и эксплуатации. Возникла необходимость создания единых научно-методических подходов к выработке мер по комплексному обеспечению защищенности важнейших объектов инфраструктуры от воздействий на состояние технологической и техногенной безопасности поражающих факторов аварий и катастроф, а также реализации мер правового, экономического, технического, надзорного и специального характера на всех уровнях - международном, национальном, региональном, отраслевом и объектовом по повышению требований к безопасности продукции.

Для России, ставящей задачи об удвоении ВВП в текущем десятилетии, отмеченные выше прямые и косвенные ущербы на уровне 3%, а с учетом вторичных ущербов - на уровне 5-6% от ВВП, оказываются сопоставимыми с планируемым приростом ВВП. Это делает проблему повышения безопасности производственных процессов и комплексов, а также защищенности объектов инфраструктуры критически важных для национальной безопасности (КВО) одной из приоритетных.

Только своевременная постановка новых го образования. фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, порученная указанным выше нием безопасности должно осуществляться Протоколом №4 Российской академии наук, Министерству образования и науки Российской Федерации, Министерству Российской Федерации по чрезвычайным ситуациям, гражданской обороны и ликвидации последствий стихийных бедствий, Ростехнадзору и Ростехрегулирования, а также совершенствование системы профессиональной подготовки (переподготовки) кадров в области безопасности и защищенности КВО, в том числе введение государственного заказа на подготовку специалистов в этой области, могут стать важнейшим элементом и исходной базой для обеспечения стабильного социально-экономичес-

приводить к прямым и косвенным ущербам кого развития страны, повышения уровня национальным экономикам до 3-8% ВВП, а в жизни населения, укрепления национальной ряде случаев — до 20-40%, к гибели десятков безопасности и международного престижа

# 2. Исследования проблем безопасности

Современные объекты инфраструктуры и техносферы в целом, в т.ч. машиностроительного комплекса страны (гражданского и оборонного назначения), включают десятки тысяч опасных производств, сотни тысяч опасных технологических установок, сотни тысяч километров магистральных и технологических трубопроводов, разветвленные системы коммуникаций. Они создаются с применением все более современных технологий — механических, термохимических, плазменных, вакуумных, лазерных, а также нанотехнологий. Ежегодное возникновение и развитие сотен и тысяч техногенных и природно-техногенных аварийных и катастрофических ситуаций в техносфере приводит, как отмечалось выше, к гибели и травматизму многих тысяч человек, разрушению промышленной инфраструктуры и среды обитания.

Исследования, поддержание и повышение уровня технического регулирования производственной сферы по критериям безопасности, надежности, эффективности и ресурса призваны обеспечить приемлемый уровень защищенности объектов инфраструктуры и населения. Они становятся все более важной и актуальной задачей науки, органов государственного управления и надзора, специалистов научных организаций и промышленных предприятий системы специального и высше-

Техническое регулирование с обеспечечерез определение рисков R аварий и катастроф в технической, природной и социальной сферах и управление ими по заданным параметрам. Используемый для этой цели обобщенный функционал  $F_{\scriptscriptstyle R}$  записывается в форме

$$R = F_R \{P, U\} = \sum (P_i, U_i) = \int C_P P \cdot U(P) dP =$$

$$= \int C_U P(U) \cdot U dU,$$
(1)

где Р – вероятность возникновения аварий или катастроф; U — математическое ожидание ущерба от них; C — весовые функции; i — вид аварий или катастроф.





Для обеспечения техногенной безопасности в XXI веке должно быть учтено, что в мировой техногенной гражданской и оборонной сферах насчитывается до  $10^3$  объектов ядерной техники мирного и военного назначения, более  $5\cdot10^4$  ядерных боеприпасов, до  $8\cdot10^4$  тонн химических вооружений массового поражения, сотни тысяч тонн взрывопожароопасных, сильнодействующих ядовитых веществ, десят-

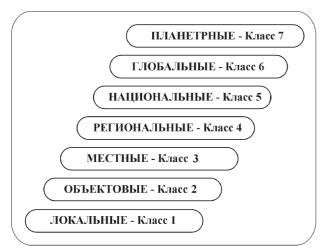


Рис. 1. Типы аварийных и катастрофических ситуаций.

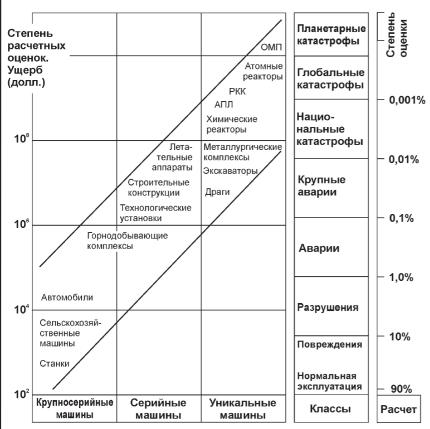


Рис. 2. Ущербы на одну катастрофу от необеспечения надежности и безопасности промышленных объектов.

Для обеспечения техногенной безопас- ки тысяч объектов с высокими запасами поти в XXI веке должно быть учтено, что в ми- тенциальной и кинетической энергии, энерой техногенной гражданской и оборонной гии газов и жидкостей.

Государственные доклады МЧС России, Ростехнадзора (Госгортехнадзора России), Минприроды России о состоянии безопасности природно-техногенной сферы позволили дать оценку R, P и U по реализовавшимся опасностям, угрозам и вызовам. Обобщение [2-6] отечественной и зарубежной информации позволило классифицировать P и U в зависимости от типов аварийных и катастрофических ситуаций (рис. 1).

Вероятности возникновения наиболее тяжелых катастроф 4-6 классов в мирное время составляют от  $(2\div3)\cdot10^{-2}$  до  $(0,5\div1)\cdot10^{-1}$  1/год, а ущербы от  $10^{11}$  до  $10^{9}$  долл./катастрофа. При этом их риски изменяются в пределах от  $10^{4}$  долл./год до  $10^{10}$  долл./год.

При анализе безопасности в техногенной сфере следует учитывать как упомянутые выше ущербы, так серийность соответствующих потенциально опасных объектов. Наиболее тяжелые аварийные ситуации возникают на уникальных объектах - единичных и многосерийных, к которым предъявляются повы-

шенные требования по безопасности. Число однотипных атомных энергетических реакторов в мире составляет 1-10 при их общем числе в эксплуатации 450-500 (в России около 30), число однотипных ракетно-космических систем обычно составляет от 3-5 до 50-80 (рис. 2). Среднесерийные потенциально опасные объекты исчисляются сотнями и тысячами, а крупносерийные - десятками и сотнями тысяч (автомобили, сельскохозяйственные машины, станки). В соответствии с изложенным интегральные экономические риски, определяемые произведением единичных рисков на число объектов, оказываются сопоставимыми как для глобальных, так и для объектовых катастроф.

Таким образом, ущербы от единичных катастроф глобального и объектового масштаба отличаются на 8-10 порядков,





риски - на 4-6 порядков, а интегральные ущер- ностью следует, что качественное и количесбы - на 1-3 порядка.

Исключительно важное значение как для нашей страны, так и для других промышленно развитых стран, имеет достигнутый уровень проектного обоснования безопасности различных объектов техносферы федерального, регионального и местного значения. Применительно к локальным и объектовым авариям для крупносерийных технических систем, в которых опасные повреждения возникают в нормальных условиях эксплуатации, уровень проектного обоснования безопасности и надежзначение имеют национальные и международные нормы проектирования, изготовления и эксплуатации, а также огромный и длительный опыт поддержания и повышения безопасности производства и обеспечения бесперебойного функционирования этих систем.

Опасные и катастрофические разрушесистем в условиях нормальной эксплуатации даже при росте требований к безопасности прогнозируются уже в существенно меньшей мере - от 1 до 10%. Предварительный количественный анализ крупных аварийных ситуаций удается пока проводить в 0,1-1,0% случаях. Конкретные техногенные катастрофы региоют отражение в расчетах и прогнозах не более, чем в 0,001-0,1%. Глобальные катастрофы на десятками миллионов; уникальных объектах, к которым предъявляровании, изготовлении и эксплуатации, как ности - их число измеряется сотнями тысяч; правило, не предсказываются.

генных аварий и катастроф на объектах с ис- Федерации - их число измеряется тысячами. ключительно высокой потенциальной опас-

твенное различие в уровнях требуемых и приемлемых (в национальных и международных рамках) рисков, с одной стороны, и уровнем реализованных рисков, с другой, достигает двух и более порядков. Вместе с тем известно, что повышение уровня защищенности объектов техносферы от аварий и катастроф на один порядок требует больших усилий в научно-технической сфере и существенных затрат, сопоставимых с 10-20% стоимости проек-

фундаментальных [10-12] и приности составляет 10-100%. При этом большое кладных [1-4, 13-15] исследованиях последних трех десятилетий поставлена новая задача об определении и обеспечении безопасности объектов техносферы по критериям приемлемых рисков. При такой постановке задачи только безопасность с заданными уровнями рисков дает основание к принятию (или непринятию) решений о допустимости реализания крупно- и среднесерийных технических ции новых проектов или допустимости эксплуатации действующих объектов техносферы. По уровню потенциальной опасности, по требованиям законодательства и решениям Совета Безопасности Российской Федерации объекты техносферы могут быть разделены на три основные группы (рис. 3):

-объекты технического регулированального и национального характера получа- ния (ОТР) по закону о техническом регулировании - их число измеряется миллионами и

объек--опасные производственные ются самые высокие требования при проекти- ты (ОПО по закону о промышленной безопас-

-критически важные объекты (КВО) Из данных о вероятностях и рисках техно- по решению Совета Безопасности Российской



Рис. 3. Структурная схема анализа потенциально опасных объектов





отнесены к единичной аварийной ситуации. мально возможными ущербами и жертвами; Однако по мере перехода от уникальных и единичных объектов (КВО) к серийным (ОПО) и массовым (ОТР) крупносерийным нарастает их суммарное число, и интегральные ущербы печения безопасности и защиты особо опасот необеспечения их надежности и безопасности; при этом риски начинают резко возрастать, переводя их в категорию стратегических рисков [9] (рис. 1, 3). В этой связи система государственного надзора за безопасностью на большом числе КВО, ОПО и ОТР должна охватывать широкий спектр технологий, сценариев катастроф, видов повреждений, условий на- йствий и предупреждение чрезвычайных сигружения, методов диагностики и контроля.

Для КВО гражданского и оборонного комплексов, а также для ряда ОПО, на базе обоб- ций вслед- ствие реализовавшихсяи угроз. щения опыта атомной энергетики и ракетно-космической техники типы аварийных и катастрофических ситуаций и степень их защищенности при переходе от нормальных условий эксплуатации к аварийным можно принять по табл. 1 следующим образом:

- режимные аварийные ситуации при отклонении от нормальных условий эксплуатании потенциально опасных объектов, последствия от них предсказуемые, защищенность от них достаточная);
- проектные аварийные ситуации (вознимов с предсказуемыми и приемлемыми после- рии); дствиями, защищенность от них частичная);
- никают при необратимых повреждениях ответственных элементов с высокими ущербами и человеческими жертвами; степень защищенности от них недостаточная с необходимостью ных работ);
- гипотетические аварийные ситуации (могут возникать при непредсказанных зара- лизируемых аварийных ситуаций всеми мето-

Указанные выше вероятности и ущербы нее вариантах и сценариях развития с максизащищенность от них низкая и прямому восстановлению объекты не подлежат).

> При разработках методов и систем обесных объектов (КВО, ОПО и ОТР) от угроз природного, техногенного и террористического характера должны постулироваться указанные выше аварийные ситуации и рассматриваться необходимость учета указанных выше двух базовых положений:

- снижение рисков инициирующих воздетуаций;
- снижение рисков чрезвычайных ситуа-

Для защиты КВО и ОПО от инициирующих воздействий и развиваю- щихся чрезвычайных ситуаций исследуются и разрабатываются следующие типы систем защиты (рис. 4):

- жесткая защита 1 (защита, на преодоление которой необходимо затратить большое количество энергии);
- постоянно действующая функциональции (возникают при штатном функционирова- ная защита 2 (защита, которая в случае аварии или выхода из режима нормальной эксплуатации элементов сложной технической системы способна взять на себя выполнение отдельных функций системы в течение ограниченного кают при выходе за пределы штатных режи- времени, либо предотвратить развитие ава-
  - естественная защита 3 (предусматривает - запроектные аварийные ситуации (воз- использование пассивных природных явлений и процессов, направленных на прекращение аварии и снижение уровня поражающих факторов);
- комбинированная защита (объединяюв последующем проведения восстановитель- щая свойства жесткой, функциональной и естественной систем защиты).

При этом степень защищенности от ана-

Табл. 1

Типы аварийных ситуаций и степень защищенности объектов техносферы.

№	Аварийные ситуации	Защищенность	Риски
1.	Нормальные условия эксплуатации	Повышенная	Управляемые
2.	Отклонения от нормальных условий (режимные ЧС)	Достаточная	Регулируемые
3.	Проектные авария	Частичная	Анализируемые
4.	Запроектные аварии	Недостаточная	Повышенные
5.	Гипотетические аварии	Низкая	Высокие





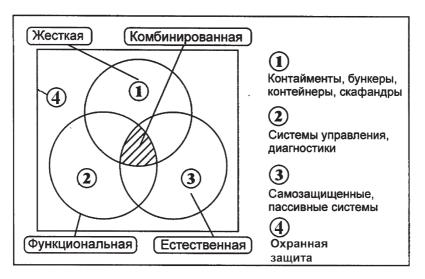


Рис. 4. Типы и системы защиты от аварий и катастроф.

дами и риски их возникновения остаются раз-  $\,$  оценке  $\,P_{\scriptscriptstyle S}\,$  при изменении  $\,P_{\scriptscriptstyle N}\,$  определяется не личными (табл. 1).

рованных воздействий и терроризма в допол- ми, но лицами, принимающими решения на нение к рассмотренным системам защиты до- всех уровнях государственного управления бавляется специальная охранная защита 4, охватывающая сами высокорисковые объекты, их персонал и существующие защитные уровня защищенности КВО, ОПО и ОТР от барьеры. В ее состав включаются соответствующие военизированные и специальные подразделения, оснащенные системами наблюдения и оповещения, а также средствами вооружения и военной техники.

Снижение рисков для КВО, ОПО и ОТР, как правило, достигается применением комплекса всех указанных систем защиты.

Если проводить анализ рисков природных и техногенных катастроф (или рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера), то с учетом [2, 6-8] для вероятности реализации стратегических системных угроз с использованием функционала  $F_{\scriptscriptstyle PS}$  можно запи-

$$P_{S} = \{ F_{PS} P_{N, I} P_{T, I} P_{O} \}, \tag{2}$$

 $P_{\scriptscriptstyle S} = \left\{ \begin{array}{c} F_{\scriptscriptstyle PS} P_{\scriptscriptstyle N} \, , P_{\scriptscriptstyle T} \, , P_{\scriptscriptstyle O} \end{array} \right\} \! , \tag{2}$  где  $P_{\scriptscriptstyle N} -$  вероятность появления неблагоприятного события, обусловленная человеческим фактором;

 $P_{\scriptscriptstyle T}$ - вероятность, обусловленная COстоянием объектов техносферы;

 $P_{o}$  — вероятность, обусловленная воздействием окружающей среды.

Вид функционала (2) остается таким же и для вероятностей реализации интегральных, дифференцированных и объектовых рисков. техносферы; Важное значение при этом имеет то обстоятельство, что роль человеческого фактора в щей среде.

только операторами и персоналом, их профес-Применительно к проблеме несанкциони- сиональными и физиологическими качестванациональной безопасностью.

> Вероятности  $P_{\tau}$  существенно зависят от аварий и катастроф. Эта защищенность определяется качеством их исходного и текущего состояния, степенью деградации объектов на заданной стадии эксплуатации, уровнем диагностирования и мониторинга. Такое положение указывает на прямое взаимодействие параметров  $P_{\scriptscriptstyle T}$  и  $P_{\scriptscriptstyle N}$  с учетом базовых показателей надежности объектов техносферы.

Вероятности  $P_{\scriptscriptstyle O^{\prime}}$  как известно, зависят от проявления опасных природных процессов, а также от состояния КВО, ОПО и ОТР и, следовательно, от  $P_{\tau}$ . Принятие необоснованных (с точки зрения стратегических рисков) решений о размещении объектов техносферы и зон проживания делает параметр  $P_{o}$  зависящим и (2) of  $P_N$ .

Ущербы  $U_{\scriptscriptstyle S}$  от реализации системных стратегических угроз в общем случае можно записать через функционал  $F_{\scriptscriptstyle US}$ 

 $U_S = F_{US} \{ U_N, U_T, U_O \},$ 

ущербы, наносимые населению при взаимодействии первичных и вторичных поражающих факторов при реализации стратегических системных угроз;

 $U_{\scriptscriptstyle T}$  – ущербы, наносимые объектам

 $U_{o}$  – ущербы, наносимые окружаю-





Величины  $U_{N'}$   $U_{T}$  и  $U_{O}$  могут измеряться как в натуральных единицах (например, числом погибших людей, числом разрушенных объектов и площадью поврежденных территорий), так и в эквивалентах (например, в экономических, денежных показателях).

В целом в России с учетом социально-экономических преобразований базовые характеристики рисков R аварий и катастроф техногенного и природно-техногенного характера, определяемые их ущербами U (или тяжестью T) и вероятностью P (или числом N), имеют сравнительно сложный характер изменения во времени  $\tau$  с общей тенденцией к возрастанию (рис. 4).

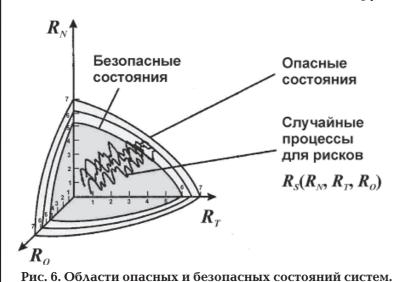
Из данных рис. 5 вытекает важнейшая роль управления безопасностью по критериям рисков, повышения надежности и безопасности продукции, а также уровня и качества подготовки специалистов всех уровней, способствующих снижению вероятностей возникновения аварий и катастроф и сопутствующих им ущербов U.

В тех случаях, когда для КВО, ОПО и ОТР определены риски  $R_{\scriptscriptstyle S}$  (для населения  $R_{\scriptscriptstyle N^{\scriptscriptstyle I}}$  для объектов техносферы  $R_{\scriptscriptstyle T}$  и для окружающей среды  $R_{\scriptscriptstyle O}$ ), поверхность предельных состояний для таких объектов может быть построена в величинах системных рисков  $R_{\scriptscriptstyle S}$  (рис. 6).

$$R_S = \sqrt{R_N^2 + R_T^2 + R_O^2} \,. \tag{4}$$

Для достижения приемлемой защищенности КВО, ОПО и ОТР необходимо осуществление комплекса мероприятий по снижению  $R_{\rm s}$ .

Если на шкалах  $R_{\tau}$ ,  $R_{N}$  и  $R_{O}$  отложить градации (классы) 1-7 аварий и катастроф по степе-



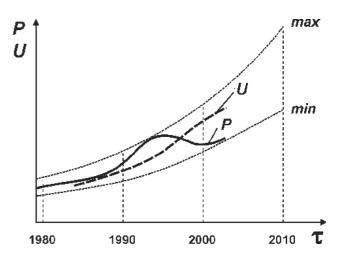


Рис. 5. Изменение во времени числа N и тяжести T катастроф.

ни возрастания их тяжести (1 — локальные, 2 — объектовые, 3 — местные, 4 — региональные, 5 — национальные, 6 — глобальные, 7 — планетарные), то представляется возможной количественная оценка степени безопасности любого из объектов (КВО, ОПО и ОТР) по критериям рисков. Такая оценка дается радиус-вектором объекта в трехмерном пространстве « $R_{\tau}$ - $R_{\nu}$ - $R_{\nu}$ ». Повышение требований к обеспечению безопасности на всех стадиях проектирования, создания и эксплуатации объектов должно способствовать снижению степени опасности объекта.

Для обеспечения безопасного состояния KBO с использованием рисков  $R_{\scriptscriptstyle N'}$   $R_{\scriptscriptstyle T'}$   $R_{\scriptscriptstyle O}$  (рис. 6) необходимо понизить возможность неконтролируемых выходов потенциально опасных ве-

ществ, энергий и потоков информации, а также снизить риски аварий и катастроф. Этого можно достичь построением систем контроля, диагностики, мониторинга и защиты и введением в анализ безопасности сценариев возникновения и развития аварийных и катастрофических ситуаций. В число решаемых при этом проблем включена исторически сложившаяся последовательность формирования научных основ, разработки инженерных методов расчетов и испытаний, создания норм и правил проектирования и изготовления объектов техносферы, обеспечения их функционирования в задан-





Рис. 7. Общая структура обеспечения работоспособности объектов техносферы.

ных пределах проектных режимов параметров.

Важнейшими поэтапно повышающимися требованиями к штатному (нормальному) функционированию и проектным параметрам такого функционирования для всех объектов техносферы на всех стадиях их жизненного цикла к концу XX века стали «прочность  $\rightarrow$ жесткость  $\rightarrow$  устойчивость  $\rightarrow$  ресурс  $\rightarrow$  надежность  $\rightarrow$  живучесть  $\rightarrow$  безопасность  $\rightarrow$  управление безопасностью». На основе указанных традиционных требований и параметров можно построить так называемую пирамиду комплексного обеспечения работоспособности объектов техносферы (рис. 7).

На этой пирамиде выделены годы и основные этапы развития (I-VII), базовые требования, основные практические результаты и направления взаимодействия. Из рис. 7 видно, что каждый выше расположенный элемент пирамиды опирается на нижние элементы, как на основу. Это означает, в конечном счете, что решение вершинных проблем безопасности должно обязательно опираться на решение проблем «живучести  $\rightarrow$  надежности  $\rightarrow$  ресурса ightarrow жесткости ightarrow устойчивости ightarrow прочности» с прохождением через традиционные этапы их взаимодействия « $I \rightarrow VII$ ».

Фундаментальные результаты деления и обеспечения прочности (этап I) были получены в течение длительного времени к началу XIX века, а замкнутый анализ жесткости и устойчивости (этап II) завершился к его концу. XX век стал веком формирования теории и практики обеспечения «ресурса  $\rightarrow$ надежности → живучести» (этапы III, IV, V). На ти, ресурса и безопасности по рис. 7 для объек-

и рубеже XX и XXI веков была поставлена фундаментальная проблема анализа и обеспечения безопасности (этап VI) и управления безопасностью (этап VII) для всех потенциально опасных объектов гражданского и оборонного назначения [2]. На этом этапе требование безопасности было сформулировано как определяющее, что потребовало развития нового направления «VII  $\rightarrow$  I», как основного для будущего развития техносферы.

Каждому из традиционных этапов цепочки « $I \rightarrow VII$ » соответствовал свой практический результат в исследованиях, проектировании, создании и эксплуатации объектов техносферы «неразрушаемость → сохранение размеров и формы -> долговечность -> отказоустойчивость → трещиностойкость→ приемлемые риски отказов, аварий и катастроф».

По такому пути (традиционное направление) шло развитие самой техносферы и методов обеспечения работоспособности всех основных ее объектов.

В соответствии с рис. 3 и 7 для КВО в обязательном порядке необходимо удовлетворение базовых требований по этапам «VII  $\rightarrow$  I», для ОПО - возможно практическое выполнение требований «VII  $\rightarrow$  I», для OTP - важно частичное выполнение требований из цепочки «VII ightarrow I». Эти условия будут закрепляться в технических регламентах и стандартах.

### 3. Научная база прочности, ресурса и техногенной безопасности.

Решение основных проблем прочнос-





тов техносферы (см. рис. 3) опирается на фун- и технологии. Для запроектных аварийных и даментальные результаты XVII - XXI веков, катастрофических ситуаций уровень опредеполученные в таких дисциплинах, как сопро- ленности по указанным параметрам техничестивление материалов, теория упругости, тео- кого задания снижается, что связано с необхотермоциклической прочности, линейная и не- нештатных и несанкционированных возделинейная механика разрушения, механика ка- йствий и условий. В таких случаях погрешностастроф, теория безопасности и рисков. Эта ти в определении рисков возрастают. Гипотетеоретическая база была положена в основу тические катастрофические ситуации в значитрадиционного проектирования всех объектов тельной степени рассматриваются для маловетехносферы (рис. 8). Новые методы анализа и роятных, но чрезвычайно опасных воздепроектирования, исходя из определяющих йствий и условий (в т.ч. террористических, вотребований безопасности и рисков, потребу- енных, природных). В таком случае ущербы диционных теориях. При этом в анализ безо- кими и малоопределенными. пасности и рисков войдут нормы проектирования и расчетов с учетом аварийных и катастро- и прочности в таких ситуациях опирается на фических ситуаций (проектных, запроектных развитие новых научных направлений [11, и гипотетических) [2, 10-12].

Для проектных аварийных ситуаций должен выполняться общий анализ «безопас- ческая прочность в вероятностной постановность  $\rightarrow$  живучесть  $\rightarrow$  надежность  $\rightarrow$  ресурс  $\rightarrow$  ке; жесткость  $\rightarrow$  устойчивость  $\rightarrow$  прочность» с повышенным уровнем определенности в формировании технических заданий и соблюдении требований эксплуатации, выбора материала

рия пластичности, теория ползучести, теория димостью включения в анализ опасных редких ют развития дополнительных разделов в тра- получаются максимальными, а риски - высо-

> Решение вопросов безопасности, ресурса 16-18]:

- статическая, циклическая и динами-
  - теория катастроф;
  - теория техногенной безопасности.
- Эксплуатационные воздействия объекты техносферы (КВО, ОПО, ОТР) харак-

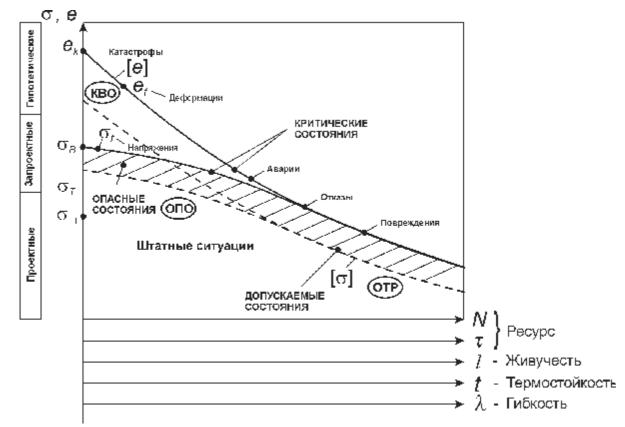


Рис. 8. Диаграммы опасных и безопасных состояний.





теризуются: числами циклов N, временем нагружения  $\tau$ , температурой t. При этом параметры N и  $\tau$  определяют ресурс объекта, а t — его термостойкость (хладоломкость или жаростойкость). Состояние дефектности несущих конструкций определяется размерами l, формой и расположением дефектов (трещин). Величины l являются исходными для определения живучести объектов. Характеристика гибкости  $\lambda$  несущего элемента рассматриваемого объекта зависит от формы и размеров поперечного сечения, длины и вида опоры; она определяет устойчивость элемента.

Внешние штатные и нештатные т.ч. аварийные и катастрофические) воздействия создают в анализируемом элементе расчетный уровень напряжений о и деформаций е; они зависят от действующих усилий (механических, тепловых, электромагнитных, аэрогидродинамических, сейсмических и др.), способа их приложения, размеров и форм сечений. Если эти воздействия возрастают, то в определенный момент в несущих элементах достигаются предельные (критические) состояния - элементы разрушаются, теряют устойчивость, получают недопустимые деформации; напряжения и деформации в этот момент приобретают предельные (критические) значения  $\sigma_{t}$   $e_{t}$ 

Величины  $\sigma_n$   $e_t$  в соответствии с рис. 8 зависят от N,  $\tau$ , l, t,  $\lambda$ . По этим зависимостям строятся:

- кривые усталости (выносливости) в напряжениях « $\sigma_{\scriptscriptstyle f} N_{\scriptscriptstyle f}$ » и деформациях « $e_{\scriptscriptstyle f} N_{\scriptscriptstyle f}$ »;
- кривые длительной прочности в напряжениях « $\sigma_{_f} \tau_{_f}$ » и деформациях « $e_{_f} \tau_{_f}$ »;
- кривые трещиностойкости (живучести) в напряжениях « $\sigma_{\scriptscriptstyle f} l_{\scriptscriptstyle f}$ » и деформациях « $e_{\scriptscriptstyle f} l_{\scriptscriptstyle f}$ »;
- кривые термостойкости (хладостойкости и жаростойкости) в напряжениях  $(\sigma_t - t_t)$  и деформациях  $(\sigma_t - t_t)$ ;
- кривые устойчивости (общей или местной) в напряжениях « $\sigma_i \lambda_i$ » и деформациях « $e_i \lambda_i$ ».

При относительно невысоких уровнях внешних воздействий, когда возникающие деформации оказываются упругими, расчеты в напряжениях и деформациях дают одинаковые результаты. При повышенных напряжениях, когда возникают общие и локальные пластические деформации, расчеты в напря-

жениях  $\sigma$  и деформациях e расходятся — величины напряжений  $\sigma_{\!\scriptscriptstyle f}$  оказываются не чувствительными к варьированию величин  $N_{\!\scriptscriptstyle f}$   $\tau_{\!\scriptscriptstyle f}$   $l_{\!\scriptscriptstyle f}$   $\lambda_{\!\scriptscriptstyle f}$  Это предопределяет важность перехода традиционных расчетов в напряжениях  $\sigma_{\!\scriptscriptstyle f}$  к расчетам в деформациях  $e_{\!\scriptscriptstyle f}$ 

Потенциальная опасность как самих объектов техносферы, так и внешних воздействий на них нарастает и риски возникновения повреждений, аварий и катастроф повышаются; средняя область рис. 8 характерна для ОПО и связанных с ними катастроф, аварий и отказов; нижняя область рис. 8 характерна для ОТР и связанных с ними аварий, отказов и повреждений; верхняя левая область рис. 8 характерна для КВО и связанных с ними катастроф.

Если ввести запасы  $n \ge 1$  по оси ординат ( $\sigma$ , e) и по оси абсцисс (N,  $\tau$ , l, t,  $\lambda$ ) рис. 8, то область предельных (критических) состояний опустится до допускаемых состояний [ $\sigma$ ], [e] и [N], [ $\tau$ ], [l], [t], [ $\lambda$ ].

Создание и эксплуатация объектов техносферы в области допускаемых состояний характеризуется удовлетворением комплекса требований в цепочке «прочность — устойчивость — ресурс — живучесть — безопасность» по указанным выше параметрам. При этом риски повреждений, аварий и катастроф внутри области допускаемых состояний могут считаться приемлемыми с учетом накопленного научного и практического опыта.

Неблагоприятное изменение основных параметров нагруженности (рост напряжений  $\sigma$ , деформаций e, числа циклов N, времени  $\tau$ ), увеличение размеров дефектов l, гибкости  $\lambda$ , увеличение (или снижение) температур t может вызвать переход от штатных ситуаций к опасным - аварийным и катастрофическим. При этом риски окажутся выше приемлемых (или допустимых), а безопасность - необеспеченной.

# 4. Регулирование и повышение безопасности.

Государственное, региональное и объектовое управление, регулирование и обеспечение безопасности по критериям системных рисков сводится к качественному и количественному статистическому и детерминированному анализу на данном отрезке времени  $\Delta \tau$ 





всех параметров уравнения (1) и осуществле- тера приоритетное значение приобретают нию комплексных мероприятий по снижению стратегических рисков от фактических неприемлемых  $R_{s}$  до приемлемых (допустимых) уровней  $[R_s]$ :

$$R_S = P_S U_S \le \left(\frac{1}{n_S}\right) \cdot \left[R_S\right] = \\
= \left(\frac{1}{n_S}\right) \cdot \left[P_S\right] \cdot \left[U_S\right] = F_Z \left(m_Z Z\right)^T$$
(5)

тегическим рискам;

 $[P_s]$ ,  $[U_s]$ - приемлемые (допускаемые) вероятности и ущербы;

Z — затраты на снижение рисков;

 $m_{x}$  — эффективность  $(1 \le m_z \le 10).$ 

Безопасность по критериям рисков может считаться обеспеченной, если будет достигнута справедливость неравенства  $n \ge 1$ .

Для России в настоящее время по основным показателям системных рисков величины  $n_s$  крайне низки (не более 0,01÷0,1).

Отрезок времени  $\Delta \tau$ , для которого можно определять риски  $R_{s'}$  обычно принимается равным одному году ( $\Delta \tau = 1$  год).

В соответствии с выражением (5) управление и планирование с использованием критериальной базы, основанной на рисках, сводится к следующим основным задачам:

- развитию научных методов анализа рисков  $R_s$  и их основных параметров  $P_s$  и  $U_s$ ;
- принятию решений об уровне допускаемых величин  $[R_s]$ ,  $[P_s]$  и  $[U_s]$  с оценкой величин запасов  $n_{c}$ ;
- научно обоснованному определению уровня затрат Z на снижение рисков с выбором и повышением эффективности затрат  $(m_{-})$ .

При этом прогнозирование, мониторинг и предупреждение аварий и катастроф на КВО, ОПО и ОТР оказывается существенно эффективнее, чем ликвидация последствий ЧС. Величины Z при надлежащем обосновании мероприятий по снижению рисков могут быть значительно (в  $m_z$  раз) ниже ущербов  $U_z$  наносимых экономике страны незащищенностью КВО, ОПО и ОТР.

При разработке основ государственной политики, нормативно-правовой базы, проектов федеральных программ и пилотных отраслевых и объектовых проектов по обеспечению защищенности КВО, ОПО и ОТР, населения и среды жизнедеятельности от угроз техногенного, природного и террористического харак-

научные исследования следующие разработки:

- развитие научной критериальной базы оценки безопасности и состояния КВО, ОПО и ОТР и составления государственных регистров для объектов техносферы;
- формирование научных основ и принцигде  $n_s$  – коэффициент безопасности по стра- пов построения систем защиты – жесткой, функциональной, естественной, охранной и комбинированной;
  - создание теории и методов контроля, диагностики, мониторинга и прогнозирования рисков для КВО, ОПО и ОТР на стадиях их проектирования, изготовления, эксплуатации и вывода из эксплуатации;
  - разработка учебно-методических основ подготовки и переподготовки специалистов и руководителей всех уровней в области обеспечения защищенности КВО, анализа и управления рисками.

В соответствии с изложенными выше в п.п. 1-2 данными комплексное повышение безопасности входящих в состав КВО, ОПО и ОТР объектов должно обосновываться через комплексное повышение характеристик прочности, ресурса, надежности и живучести [1-18]. Одним из путей такого повышения, как отмечалось выше, является повышение качества проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации машин и конструкций. Это позволяет с учетом уравнения (1) и рис. 1 снизить риски R возникновения аварийных и катастрофических ситуаций за счет снижения вероятности P и ущербов U от этих ситуаций. При этом анализ R, P и U по мере усложнения технических систем и увеличения тяжести аварий и катастроф (рис. 2) становится все более сложной задачей.

При повышении качества производства потенциально опасных объектов в соответствии с рассматриваемыми выражениями можно, в первую очередь, понизить параметры  $P_{\scriptscriptstyle T}$  и  $U_{\scriptscriptstyle T^{\scriptscriptstyle I}}$  характеризующие безопасное состояние техносферы и риски  $R_{\tau}$  по выражению (3). В свою очередь характеристики  $P_{\tau}$  и  $R_{\tau}$  в значительной степени связаны с человеческим фактором ( $P_{\scriptscriptstyle N'}$   $U_{\scriptscriptstyle N'}$   $R_{\scriptscriptstyle N}$ ) и воздействиями окружающей среды на объекты техносферы  $(P_{o'} U_{o'} R_{o}).$ 

Все указанные выше параметры в соответствии с (4) определяют системные риски  $R_{\rm s}$  и условие приемлемости рисков по (5). В этой связи можно говорить о повышении уров-





критически важных  $R_{T}$ ,  $R_{N}$ ,  $R_{O}$  и  $R_{S}$  (рис. 6).

Управление рисками ПО ные характеристики, входящие в уравнения (1) - (5). В первую очередь, это относится к обеспечению качества конструкционных материалов за счет широкого использования проплавки, термообработки, химикотермической, термомеханической обработки. Они позволяют получить заданного качества химический состав, структуру и механические свойства конструкционных материалов по их базовым характеристикам. Дополнительно к ним требования качества конструкционных материалов как пределы прочности, текучести, выносливости, длительной прочности, коэффициенты упрочнения в упругопластической области, критические коэффициенты интенсивности напряжений и деформаций.

Качество и точность изготовления несущих элементов машин и конструкций позволяют регулировать и обеспечивать их задан- ниженные ные размеры, что при заданных эксплуатационных нагрузках дает возможность получать онных напряжений, а также учитывать эффект абсолютных размеров.

Чрезвычайно важной для цикличесроль концентрации напряжений, определяе- в выражения (1) - (5). мой теоретическими и эффективными коэффициентами концентрации. Это обстоят- ческих систем и критически важных объектов ельство требует повышенного внимания при механической обработке к зонам концентрации - отверстиям, выточкам, надрезам, резьбам, галтелям, фаскам.

Так как обычно процессы повреждения и разрушения формируются в поверхностных слоях деталей и элементов машин и конструкций, то требования качества распространяются на получение заданной микрогеометрии поверхностей, заданного уровня и знака остаточных поверхностных напряжений как в зонах концентрации, так и вне этих зон. В соответствии с этим при оценках прочности,

ня проектирования, испытаний, изготовления ресурса и живучести используются критичеси эксплуатации всех технических систем и, кие значения характеристик локальных мехаобъектов нических свойств. Управление качеством за (КВО) с использованием критериев рисков - счет этих характеристик достигается соответствующими видами поверхностных обрабокритериям ток (механических - точение, фрезерование, прочности, ресурса, надежности и живучести сверление, шлифование, хонингование, алпредопределяет необходимость обеспечения мазное выглаживание, электрохимических, безопасности ОТР, ОПО, КВО через расчет- лазерных, плазменных). В ряде случаев поверхностные обработки сочетаются с поверхностными закалками, наклепом, микролегированием, плакированием.

Особую роль в обеспечении ресурса грессивных металлургических процессов вы- и живучести имеет качество дефектоскопического контроля, позволяющего оценивать состояние микро- и макродефектов в наиболее нагруженных зонах. При этом наибольшую потенциальную опасность имеют дефекты типа трещин; их параметры входят в расчетные уравнения ресурса и живучести.

Надежность технических систем и вераспространяются на такие характеристики, роятность возникновения на них аварийных и катастрофических ситуаций в значительной степени определяется устойчивостью качества всех указанных выше технологических операций при их изготовлении. При этом наряду с повышением основных расчетных характеристик в уравнениях (1)-(5) важнейшими показателями безопасности оказываются поуровни коэффициентов вариации.

Достижение заданных уровней безозаданные уровни номинальных эксплуатаци- пасности КВО, ОПО и ОТР по критериям рисков в рамках технического регулирования с учетом всех его сложностей [17, 19, 20] будет базироваться на надлежащем учете роли челокой, малоцикловой, длительной статической и веческого фактора  $(P_{\scriptscriptstyle N^{\prime}}\,U_{\scriptscriptstyle N})$ , а также параметров низкотемпературной прочности оказывается состояния природной среды  $(P_{\scriptscriptstyle O^{\prime}}\,U_{\scriptscriptstyle O})$ , входящих

> Таким образом, для сложных технибудет выстраиваться комплексная методология технического регулирования, использующая методы и системы оценки, обеспечения и повышения характеристик прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- 1. Машиностроение. Энциклопедия, тт. 1-28. М.: Машиностроение, 1996 — 2005.
- Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические





- аспекты. Многотомное издание. М.: МГФ «Знание» т.т. 1-28, 1997-2006 гг.
- ное издание. М.: «Крук», тт. 1-6, 1999-2003.
- 4. Гражданская защита. Энциклопедический словарь. Под общ. редакцией С.К.Шойгу. МЧС России. М.: ДЭКС-ПРЕСС. 2005. 568
- (А-И). Под общ. редакцией С.К.Шойгу. МЧС России. М.: Московская типография №2. 2006. 568 c.
- 6. ГНТП «Безопасность». Концепция и итоги 16. Стратегические риски чрезвычайных сиработ 1991-1992 гг. М.: ВИНИТИ, 1993. Т.1 -480 c. T.2 - 350 c.
- 7. Достижения и задачи машиноведения. К 70-летию академика К.В.Фролова. М.: МГФ «Знание». 2006. 416 с.
- 8. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Научные исследования и подготовка специалистов по обеспечению защищенности критически важных объектов. Машиностроение и инженерное образование. М.: Изд.: МГИУ. 2004, №1. C. 19-32.
- 9. Катастрофы и образование. Под ред. Ю.Л.Воробьева. М.: Эдиториал УРСС, 1999,
- 10. Н.А.Махутов. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение. 1981. 272 c.
- 11. Н.А.Махутов. Конструкционная проность. В двух частях. Новосибирск: Наука. 2005. Часть 1: Критерии прочности и ресурса — 494 с. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности — 610 с.
- 12. Н.А.Махутов, В.Н.Пермяков. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопро-

- водов. Новосибирск: Наука, 2005. 516
- 3. Природные опасности России. Многотом- 13. Исследования прочности при малоцикловом нагружении. Серия из 8 книг. М.: Наука, 1975 — 2006.
  - 14. Исследования напряжение и прочности ядерных реакторов. Серия из 6 книг. М.: Наука, 1987 — 2004.
- 5. Гражданская защита. Энциклопедия. Том I 15. Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем. Серия из 5 книг. Новосибирск: Наука, 2002 -2006.
  - туаций: оценки и прогноз. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. 15-16 апреля 2003 г. М.: ЦСИ МЧС, 2003. 400 с.
  - 17. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Оценка и контроль рисков в техногенной сфере. Партнеры и конкуренты. Методы оценки соответствия. Научно-практический журнал. Москва: РИА «Стандарты и качество». 2006, № 1. C. 22-26.
  - 18. Прочность, ресурс и безопасность машин и конструкций. Под. ред. чл.-корр. РАН Н.А.Махутова, к.т.н. М.М.Гаденина. Москва: ИМАШ РАН. 2000. 527 с.
  - 19. Механика катастроф. Методические рекомендации. Под. Н.А.Махутова, ред. Е.М.Морозова, М.М.Гаденина. Т 1, М.: МИБ СТС, 1995, Т. 2. М.: ФЦНТП «Безопасность». 2001. 254 с.
  - чность, ресурс и техногенная безопас- 20. Н.А.Махутов, М.М.Гаденин. Обеспечение безопасности: Проблемы качества и технического регулирования. Стандарты и качество. №6, 2007. С. 32-36.





Sugisaka M., Loukianov A., Xiongfeng F., Kubik T., Kubik K.B.

УДК 681.518

# **DEVELOPMENT OF AN ARTIFICIAL BRAIN** LIFEROBOT

### 1. Introduction.

The objective of our research is that the LifeRobot. artificial brain has to provide the robot with abilities to perceive an environment, to interact with humans, to make intelligent decisions and to data collection and processing, etc.

are navigation, learning, information, humanrobot interface, and reasoning. In the navigation, robot localization investigated. The problem is to estimate the robot location in environment using sensor data. Localization issues are position tracking, global localization; recovery from errors and incorrect location information.

In the navigation, planning is investigated. The problem is to find how to move to the desired issues are described briefly. place based on the topological map of the environment. In the learning, skills investigated. Learning issues are to provide intelligent robot with an ability to adapt to changes in environment and to eliminate the need in robot programming by allowing the robot to interactively acquire new skills. In the human-robot interface, tracking recognition and command executing system considered. The problem is to find a face in the image taken by robotcameras and trace its two computers later). movements. These problems are under our investigations. This paper describes the new human being and robot is shown in Fig. 4(a) and

techniques developed in our researches for

### 2. Research issues of LifeRobot.

The LifeRobot prototype developed at learn new skills. Application areas of the Artificial Life and Robotics Laboratory The LifeRobot is for human welfare, service tasks, and University of Oita is called "Tarou". The picture of Tarou is shown in Fig. 1. The main specifications The research issues of LifeRobot prototype are listed in Table 1. The research issues of LifeRobot is shown in Fig. 2. As stated in Section 1, there are five main research issues, namely, navigation, information processing, learning, human-robot interface, and reasoning. These issues are concerned with the design of the artificial brain for the LifeRobot Tarou. In this paper, the techniques developed at Artificial Life nad Robotics Laboratory for the above research

### 3. Artificial brain of LifeRobot "Tarou".

The hardware is shown in Fig. 3 two CCD cameras, two computers, two DC motors, one stepping motor, six ultra sonic sensors, 5 LEDs are installed. One portable computer is used for voice (however, this computer is replaced by the above

The analogy of brain functions between

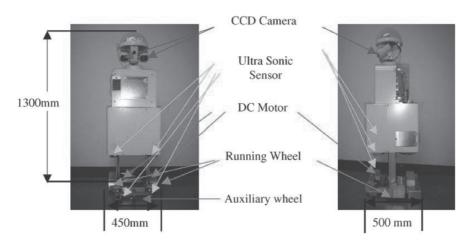


Fig. 1. The picture of Tarou (front and side views).





Table 1.

### The specifications of LifeRobot "Tarou" which is a mobile robot (names of makers and type are shown).

- 2 driving wheels (driven by DC motors controlled via I/O card, D/A converters, and PWM,
- · 2 incremental optical encoders,
- 2 castor wheels,
- rotating head (rotated by stepping motor),
- 2 CCD cameras (with zoom, pan and tilt features controlled by SONY VISCA protocol).
- 4 status Light Emitting Diodes
- · 6 ultrasonic sensors,
- · touch panel,
- keyboard,
- speakers and microphone.
- 3 computers, connected by Ethernet network\*

 $^{\star}$  2 (on board) computers are used for robot control and vision processing (with standard video card). 1 laptop is used for voice processing and cellular phone operation (with sound card and digital cellular modem).



Fig. 2. Research issues of LifeRobot "Tarou".

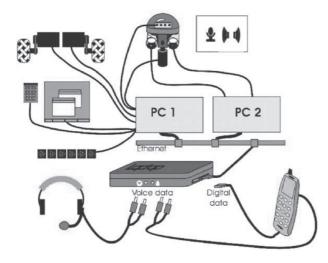
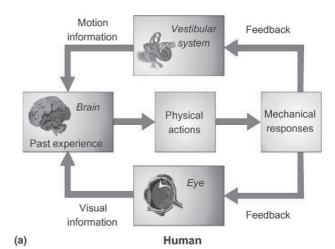


Fig. 3. Hardware of LifeRobot "Tarou".



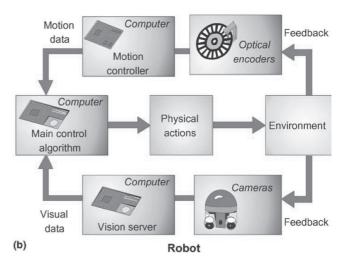


Fig. 4. Brain for human being (a). Brain for AlifeRobot "Tarou" (b).





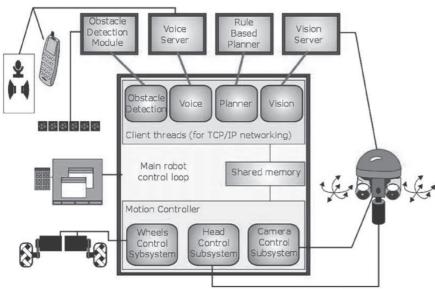


Fig. 5. Software structure of artificial brain for Tarou.

(b). The correspondence between human being brain and robot brain is clear. However, human brain is much more complex than robot brain. The hardware artificial brain has been developed for the recognition and tracking system for moving objects [1,2] thereafter for the mobile vehicle [3-5].

The artificial brain for Tarou consists of the special software. The artificial is able to perform vision based navigation [6-10], voice recognition, and face detection and face recognition. In Fig. 5 software structure of the artificial brain is shown. In Fig. 6 table is illustrated. In Fig. 5 client threads in the upper part correspond to perception and stimulus module, motion controller with three control subsystems in the lower part correspond to behavior module, and main control loop with shared memory to both client threads and motion

controller correspond to (knowledge) that memory causes reflex behavior in the artificial brain software of LifeRobot Tarou shown in Fig. 7. As shown in Fig. 7 artificial brain consists of memory, perception and stimulus module, thinking and decision module, and behavior module connected to each other.

Fig. 6 shows behavioral table. When an event occurs, the event refers behavior, namely, behavior table checking action occurs, and thereafter action execution that sends signal to motor driver, visual output, and audio

output, takes place. After the actions are executed, behavioral table updating occurs. The main loop is repeated in the artificial brain software of Tarou. Fig. 8 LifeRobot Tarou implementation of scheme in Fig. 7.

The artificial brain of Tarou produces control commands to robot actuators via wheel control subsystem and head control subsystem, video camera control via camera control subsystem, speech output, touch screen output, and status LED, On the other hand, the artificial brain receives analog sound signal from microphone or mobile phone to robot communication subsystem and video image frame from CCD camera to robot vision subsystem. Thus, behaves autonomously to perform complex tasks instructed by human being.

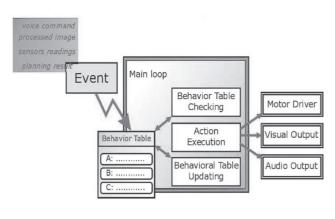


Fig. 6. Behavioral table.

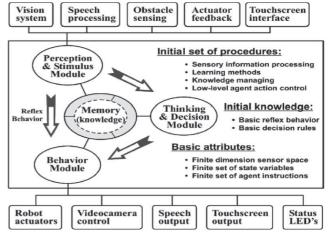


Fig. 7. LifeRobot Tarous artificial brain software.





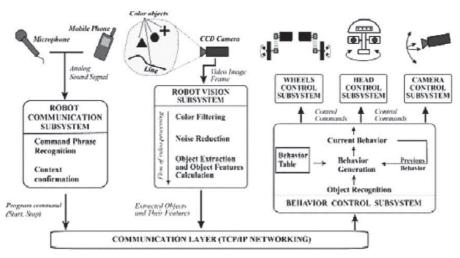


Fig. 8. LifeRobot Tarou implementation of scheme in Fig. 7.

### 3.1. Vision based navigation.

navigation based on two CCD cameras which can 
The robot will act based on the results of the image capture nearly 24 images/s: one is the continuous landmark (quideline), another is the common target as fast as possible when it is moving landmarks (circle, triangle, etc).

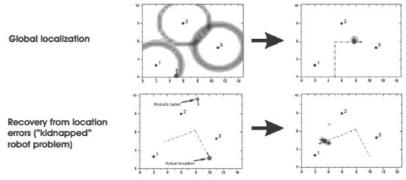
The guideline is used for positioning, and other landmarks can make the robot some specific action, such as turn, stop etc. The robot moves at the least speed of 12 cm/s.

After one image was taken, the guideline and There are two types of landmarks used in the landmarks were extracted and from that image. processing. And it has the capability to search its [6-8,10].

> Three examples for localization, learning skills, and path planning are shown in Figs. 9-11, respectively. As shown in Fig. 9 is to estimate robot location in environment using sensor data.

### Mobile robot localization Problem description: Estimate the robot location in environment using sensor data. Localization issues: · Position tracking: Global localization Recovery from errors and incorrect location information.

Probabilistic landmark-based localization using video camera



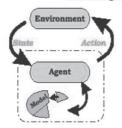
References: A.A. Loukianov, M. Sugisaka, "A Hybrid Method for Mobile Robot Probabilistic Localization Using a Single Camera," Proc. of Int. Conf. on Control, Automation and Systems, Jeju, Korea, 2001, pp. 280-283.

Fig. 9. Mobile robot rocarization of Tarou.





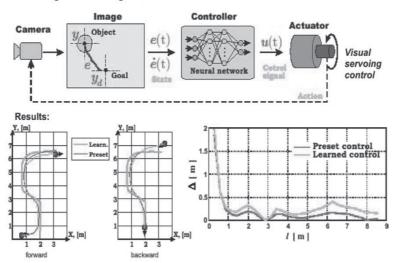
### Learning skills



### Learning issues:

- Provide intelligent robot with an ability to adapt to changes in environment;
- Eliminate the need in robot programming by allowing the robot to interactively acquire new skills.

Learning visual tracking skills



References: A.A.Loukianov, M. Sugisaka, "An Approach for Learning a Visual Tracking Skill on a Mobile Robot," Proc. of the SICE/ICASE Workshop "Control Theory and Applications", Nagoya, Japan, pp. 83-87, 2001.

Fig. 10. Learning skills of Tarou.

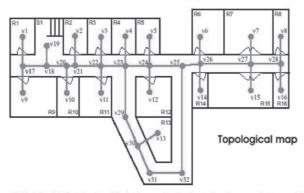
### Path planning

### Problem description:

Find out how to move from to the desired place basing on the topological map of the environment.

### Implementation:

A topological map is represented as a set of rules describing the robot environment in a natural way. Additional rules provide the information about: local navigation strategies, landmarks along paths, etc. Command plan is a list of executable commands constructed from the rules on request .



References: T. Kubik, M. Sugisaka, "Rule based robot navigation system working in an indoor environment," Proceedings of XIV International Conference on System Science, Wroclaw, Poland, II, 212-219, 2001.

Fig. 11. Path planning.



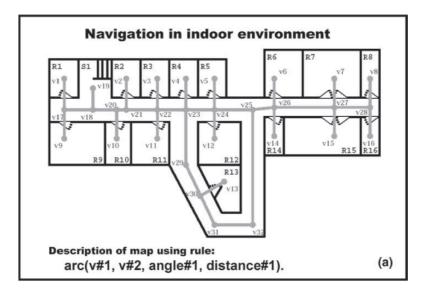


precise explanations of the figures shown in Fig.9, contents, please refer to [12]. please refer to [11].

brain functions. As indicated in the figure in Fig. place based on the topological map of the 10 (robot) acts to environment (gives action to environment. A topological map is represented as environment) and environment reacts to robot a set of rules describing the robot environment in (returns state to robot) to learn skills by making a natural way. Additional rules provide the model internally for both supervised and information about; local navigation strategies, unsupervised cases. Learning issues are how to landmarks along paths, etc. Command plan is a provide intelligent robot with ability to adapt to list of executable commands constructed from the changes in environment; how to eliminate the rules on request. In Fig. 12(a) of map using rule is need in robot programming by allowing the robot given and in Fig. 12(b) of other rules are shown; to interactively acquire new skills. Learning visual one is partial navigation strategy and other is tracking skills has been developed for visual landmark to determine location. For precise serving control [12]. As indicated in the figure in explanations, please refer to [13]. Fig. 10, image is obtained from CCD camera. The

The localization issues are position tracking, error and its derivative between object and goal global localization, recovery from errors and are calculated and they are fed to neural network incorrect location information. For this problem controller as state, which produces control signal the probabilistic landmark localization using to actuator. The experimental results are also video camera has been developed [11]. For the shown in Fig. 10. For precise explanations of

As shown in Fig. 11 path planning is to find As shown in Fig. 10 skills are one of artificial out how to move from a present to the desired



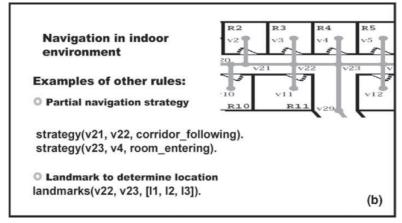


Fig. 12. (a) Navigation in indoor environment (one example) (b) Navigation in indoor environment (examples other rules).





### 3.2. Voice recognition.

Tarou has a voice recognition and command executing system, which are on two computers on described. hardware and link and local network. The voice recognition system utilizes IBM ViaVoice SDK (Software DeveloperKit) for dictation and IBM application.

Japanese:

- 1 Go # # # meter (s)/centimeter (s).
- 2 Turn your head to the left/right.
- 3 Straighten your head.
- 3 Look up/down/straight.
- 4 Turn left/right # # # degrees.
- 5 No (for canceling of a command).

(# # # means a number)

commands, the grammar file shown in Table 2 been developed for the implementation [14]. For precise explanation, please refer to [15]. easy understanding the grammar file, please refer to [14].

Japanese peoplespeaking.

### 3.3. Face detection and face recognition.

At first, as an example, the face tracking is Thereafter real-time recognition system follows. As shown in Fig. 13, face tracking is to find a face in the image taken by robotcameras and trace it movements. In this ViaVoice TTS (Text to Speech) SDK for speech algorithm, CAMSHIFT (Continuously Adaptive Mean Shift Algorithm) is used to search and track By using this system, Tarou can now a human face in images of video frame sequences. recognize the following commands in and in Firstly, a skin color model should be build to transfer a color image into a probability distribution image (Artificial fee-forward neural network (AFNN) could be used to build this model). Then, face tracking is performed by the following of CAMSHIFT.

- 1. Set the calculation region of the probability distribution to the whole image.
- 2. Choose the initial location of the 2D mean shift search window.
- 3. Calculate the color probability distribution In order for Tarou to recognize the above five in the "D region at the search location in an area slightly larger than mean shift window size. For

We have built a real-time face recognition system which is combined with detection (based IBM ViaVoice provides a tool for building a on a neural network) and face recognition (based personal voice model. For , if a voice model is on Embedded Hidden Markov Models (EMM)) made by a Japanese people (who speaks English techniques. It constantly takes images from the with Japanese accent), then, it will be easier for surroundings with the camera mounting on the the voice recognition system to understand other robothead, finds faces in them. If a face is detected, the system tries to recognize it.

Table 2

### Tarous commands implementation-grammar file.

```
<digit> = oh -> 0|0|1|2|3|4|5|6|7|8|9.
\langle \text{teen} \rangle = 10|11|12|13|14|15|16|17|18|19.
<deca> = twenty -> 2|thirty -> 3|forty -> 4|fifty -> 5|
                                                                           sixty -> 6 seventy -> 7 eighty -> 8 ninety -> 9.
\langle n2 \rangle = {\langle deca \rangle} {\langle digit \rangle} - {\langle 1 \rangle} {\langle deca \rangle} - {\langle 1 \rangle} {\langle 1 \rangle} - {\langle 1 \rangle} {\langle 1 \rangle} - {\langle 1 \rangle}
<n3>= {<digit>} (hundred and?)? {<n2>} -> {1}{2}
{\text{digit>}} hundred -> {1}00.
<numb> = <n3>|<n2>|<digit>.
\langle g-unit\rangle = centimeter -<math>\rangle c | centimeters -\rangle c | meter -\rangle m | meters -\rangle m.
<r-unit> = degree -> d|degrees -> d.
<direction> = left -> 1 | right -> r.
<cmd-1> = Stop -> s.
< cmd-2 > = Go \{< numb>\} \{< g-unit>\} -> g\{2\}\{1\}.
< cmd-3> = Turn {< direction>} {< numb>} {< r-unit>} -> t{1}{3}{2}.
<cmd-4> = Yes please -> y.
<cmd-5> = No -> n.
\langle \text{sentence} \rangle = \langle \text{cmd-1} \rangle | \langle \text{cmd-2} \rangle | \langle \text{cmd-3} \rangle | \langle \text{cmd-4} \rangle | \langle \text{cmd-5} \rangle.
```





### Face tracking

Problem description:

Find a face in the image taken by robot's cameras and trace it movements.

Implementation details:

In this application, CAMSHIFT (Continuously Adaptive Mean Shift Algorithm) is used to search and track a human face in images of video frame sequences. Firstly, a skin color model should be built to transfer a color image into a probability distribution image. (Artificial feed-forward neural network (AFNN) could be used to build this model.) Then, face tracking is performed by the following steps of CAMSHIFT

- 1. Set the calculation region of the probability distribution to the whole image.
- 2. Choose the initial location of the 2D mean shift search window.
- 3. Calculate the color probability distribution in the 2D region centered at the search window location in an area slightly larger than the mean shift window size.

References: X. Feng, Z. Wang, M. Sugisaka "Non-parametric density estimation with application to face tracking on mobile robot," Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, Cheju University, Jeju, Korea, October 17-21, pp. 426-p429, 2001.

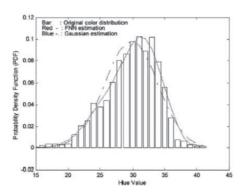










Fig. 13. Face tracking.

The neural network is trained with many face motors or artificial muscles and this project is examples to get the concept of a face. It receives a under investigation. 20x20 pixel region of the image as input, and generates an output ranging from 0 to 1, signing in this paper is depicted in Fig. 14. how close it is to a face. We use it to examine a sub-image subtracted from the input image whether it is a face.

For face recognition, we built a separate 1. EMM model for each person in the database. If a face is detected, it will be matched against each model in the database. The model, which yields 2. the largest similarity value, is reported as the host. The system have achieved a detection rate of more than 85% for front views or slightly rotated views 3. of faces.

### 4. Conclusions.

In this paper a part of the results obtained for development of the artificial for LifeRobot Tarou was described briefly. The development of the artificial brain by LSI chip(System on Chip) has been developed as another project based on the LifeRobotartificial brain results. The concept of the artificial will be used for biologically inspired dynamic bipedal humanoid robots driven by

Finally, the idea of the artificial brain stated

### REFERENCES

- M. Sugisaka, Neurocomputer control in an artificial brain for tracking moving objects, Life and Robotics 1 (1) (1997) pp.47-51.
- M. Sugisaka, Fast pattern recognition using a neurocomputer, Artificial Life and Robotics 1 (2) (1997) pp. 69-72.
- M. Sugisaka, X. Wang, T. Matsumoto, Control strategy for a smooth running of a mobile with neurocomputer, in: Proceedings Twelfth International Conference on Systems Engineering, Coventry, September 9-11, 1997, pp. 664-669.
- M. Sugisaka, Design of an artificial brain for robots, Artificial Life and Robotics 3 (1) (1999) 7-14.
- 5. M. Sugisaka, X. Wang, J.J. Lee, Artificial brain for a mobile vehicle, Applied Mathematics Computation 111 (2-3) (2000) pp. 137-145.





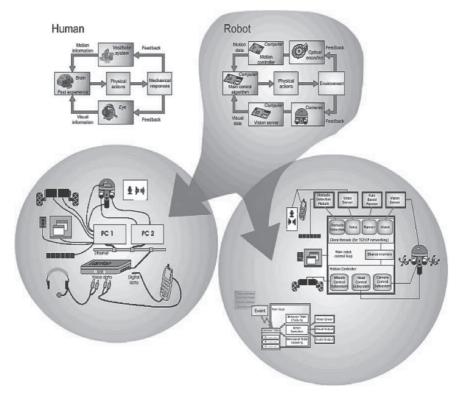


Fig. 14. The idea of artificial brain stated in this paper.

- 6. C. Radix, M. Sugisaka, Further development of an "artificial brain, in: Proceedings of 2000 Mechanical System for 21 Century, Kyong Sang Nam-Do, Korea, October 4-7, 2000, pp. 107-110.
- 7. A. Loukianov, M. Sugisaka, Supervised learning technique for a mobile robot controller in a line tracking task, in: 12. A.A. Loukianov, M. Sugisaka, An approach for Proceedings of The Sixth International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 6th ), Tokyo, Japan, January 15-17, 2001, vol. 1, pp. 238-241.
- Evaluating motion on the Alife Robot prototype: Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics (ISR 2001), Seoul, Korea, April 19-21, 2001, pp. 714-719.
- 9. M. Suqisaka, Development of Communication methods between artificial liferobot and human, IEEE Region 10th 15. X. International Conference on Electrical and Electronic Technology, CD Rom, August 19-22, 2001, pp. 894-898.
- 10. J. Wang, M. Sugisaka, Study on visual-based indoor navigation for an Alife mobile robot, in: H. Selvaraj, V. Muthukukumar (Eds.), Proceedings Fifteenth International of

- Conference on Systems Engineering, Las Vegas, USA, August 6-8, 2002, pp. 390-396.
- Symposium on Mechatronics and Intelligent 11. A.A. Loukianov, M. Sugisaka, A hybrid method for mobile robot probabilistic localization a single camera, in: Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, Cheju University, Jeju, Korea, October 17-21, 2001, pp. 280-283.
  - learning a visual tracking skill on a mobile, Proceedings of the SICE/ICASE Workshop "Control Theory and Applications, Nagoya, Japan, 2001, pp. 83-87.
- 8. C.A. Radix, A.A. Loukianov, M. Sugisaka, 13. T. Kubik, M. Sugisaka, Rule based robot navigation system working in an indoor, in: Proceedings of XIV International Conference on Systems Science, II, Wroclaw, Poland, 2001, pp. 212-219.
  - 14. T. Kubik, M. Sugisaka, Use of a cellular phone in mobile robot voice control, Power Point, internal reference, 2001, pp. 26.
  - Feng. Z, Wang, Sugiska, M. Non-parametric density estimation with application to face tracking on mobile robot, in: Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, Cheju University, Jeju, Korea, October 17-21, 2001, pp. 426-429.





Марюхненко В.С., Комогорцев М.Г., Трускова Т.В.

УДК 685.327(07);62-503.3

# ПУТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ НА ТРАНСПОРТЕ

### Введение.

В настоящее время в мире эксплуатируютмножество наземных, воздушных, транспортных средств и морских судов. С увеличением числа и видов транспорта растёт и количество возникающих критических ситуаций [1]. Аварии и катастрофы возникающие на транспорте, как правило, носят техногенный характер, создают экономические, экологические и социальные проблемы в обществе [2].

причин возникновения критических состояний на транспорте, а также поиск путей предотвращения аварийных ситуаций транспорте.

### 1. Чрезвычайные происшествия на транспорте.

является безаварийная и безопасная перевозка грузов, т.е. выполнение перевозок без аварий и катастроф. Главный критерий в различии аварий и катастроф заключается в тяжести последствий и наличии человеческих жертв. Как правило, следствием крупных аварий и катастроф являются пожары и взрывы, в более десяти крупных катастроф на транспоррезультате которых разрушаются произво- те (табл.1).

дственные и жилые здания, повреждаются техника и оборудование. В ряде случаев они вызывают тяжелые экологические последствия: загазованность атмосферы, разлив нефтепродуктов, агрессивных жидкостей и активных химических общеядовитых веществ. [3].

Авария — это повреждение машины, станка, оборудования, здания, сооружения. Производственная авария - это внезапная остановка работы или

нарушение установленного процесса производства на промышленных предприятиях, транспорте и др., которые приводят к повреждению или уничтожению материальных ценностей. Катастрофа – это авария с человеческими жертвами [4].

Ситуациям, которые являются аварийными, т.е. такими, в результате которых наступают тяжелые последствия, как правило, предшествуют предаварийные состояния, в дальнейшем называемые критическими. Своевре-Целью статьи является анализ основных менное устранение причин, вызвавших предаварийное, критическое состояние, блокирует дальнейшее развитие его в аварию или катастрофу. Предотвращение возникновения критических ситуаций может быть обеспечено мониторингом предотказных состояний технических объектов, контролем состояния человека – оператора, параметров окружающей Одной из основных задач на транспорте среды, и выработки на этой основе информачии для оперативного оповещения менеджеров всех уровней о возникновении критических ситуаций. Аварии (катастрофы) происходят на всех видах транспорта и в различных условиях (рис.1).

Только за 6 месяцев 2007 года произошло

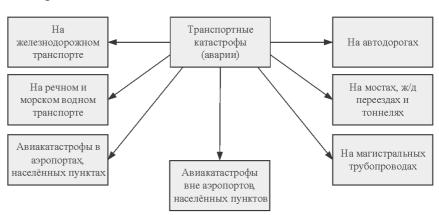


Рис.1. Классификация аварий (катастроф) на транспорте.





Табл. 1 Происшествия на транспорте в первом полугодии 2007 года.

Вид	Дата	Происшествие	Причины	Последствия
транспорта	2	3	4	5
Воздушный транспорт	21.03.2007 РФ	Во время посадки разбился Ту-134	4 Отсутствие предупреждающей информации метеонаблюдения	3
	18.07.2007 Бразилия	Самолет Airbus-320 при посадке не успел затормозить и выехал за пределы взлетно- посадочной полосы	Плохие метеоусловия, незаконченный ремонт взлетной полосы или ошибка пилота	Погибло 250 человек, разрушены заправочный пункт и здание авиакомпании
	29.07.2007 РФ	Через несколько минут после вылета разбился транспортный самолет Ан-12	Износ транспортного средства	Погибло 7 человек
	9.07.2007 РФ	Во время посадки разбился самолет Airbus-A310	Самолет сброшен с полосы левым двигателем, перешедшим во взлетный режим в момент включения реверса правого двигателя	Погибли 124 человека
Железно- дорожный транспорт	11.07.2007 РФ	С рельс сошли 15 вагонов, груженых углем	Ремонтные работы, проводимые на одном из участков железной дороги	На аварийном участке скопились 45 поездов, в том числе пять пассажирских вагоны повредили линию электропередач
	10.07.2007 РФ	Сошли с рельс 9 хвостовых вагонов пассажирского поезда	Рельсы деформировались от жары, вагон не вписался в поворот	3 человека ранено
	17.07.2007 Украина	Сошли с рельсов и перевернулись 15 цистерн с желтым фосфором	Из-за вытекания фосфора из одной цистерны произошло самовозгорание 6 цистерн	Повреждено 50 м железнодорожного полотна, около 100 м контактной сети и три опоры, образовалось облако из продуктов горения (зона поражения около 90 кв. км)
	6.08.2007 Украина	С рельс сошли 16 вагонов грузового поезда	Техническая неисправность подвижного состава	Повреждены парная и непарная колеи





Табл. 1 (продолжение)

Вид транспорта	Дата	Происшествие	Причины	Последствия
1	2	3	4	5
Водный транспорт	11.07.2007 Индия	Пассажирское судно, на борту которого находились 70 человек, пропало без вести	Отказ двигателя в штормовую погоду	45 человек пропали без вести, 2 человека погибли
	16.07.2007 Гондурас	Пожар на нефтеналивном танкере в доках	Неудовлетворитель-ны е меры безопасности на объекте	Погиб 1 человек
	9.08.2007 Гренландия	Экскурсионный корабль натолкнулся на айсберг	Плохие метеоусловия	18 пострадавших, судно повреждено упавшими на палубу крупными осколками льда
Авто- транспорт	19.04.2007 РФ, Краснояр- ский край	На скоростной магистрали столкнулись одновременно 19 автомобилей	Водитель грузовика в условиях сильного тумана и гололёда превысил скорость и не справился с управлением	Нарушено движение транспорта по магистрали
	23.07.2007 Польша	С моста упал пассажирский автобус	Водитель не справился с управлением	26 человек погибли, 24 пострадавших

Железнодорожный транспорт считается движения железнодорожный транспорт занимает третье место после автомобильного и возлет свидетельствуют о значительном числе пострадавших и погибших в результате крушений пассажирских поездов [5]. Аварийные ситуации при перевозке по железным дорогам опасных и особо опасных грузов приводят к значительным разрушениям, заражению местности и поражению токсичными веществами больших масс людей. Так же аварии на железнодорожном транспорте приводят к большим экономическим потерям, нарушается весь традит на остальных видах транспорта.

Авиакатастрофы происходят относительно редко, но количество погибших во время одной авиакатастрофы в несколько раз превышает число жертв во время одного чрезвычайного происшествия на железнодорожном и автомобильном транспорте.

Аварии на водном транспорте приводят одним из наиболее безопасных видов транс- как к тяжёлым экономическим и социальным порта. Однако, по показателям безопасности последствиям (большое число жертв, при крушении пассажирских судов, потеря материальных ценностей) так и серьёзным экологидушного. Статистические данные последних ческим последствиям, таким как разливы нефти. Особое внимание следует обратить на то, что на водном транспорте используются энергетические установки, построенные на атомных реакторах, в случае крушения таких судов возможны крупные выбросы радиоактивных веществ в водную среду и атмосферу.

Наибольшее число жертв катастроф на транспорте приходится на автомобильный транспорт, ввиду большого количества транспортных средств и невысокой, в сравнении с фик движения, чего, как правило, не происхо- другими сферами транспорта, квалификации операторов.

> Причинами ЧС на транспорте являются увеличение плотности транспортных потоков, отказы технических устройств (рис.2). Большое число аварий возникает по вине человека.







Рис. 2. Причины возникновения ЧС на транспорте.

# подвижными объектами.

В современном мире человек и машина взаимодействуют всё более тесно, происходит их взаимная интеграция. Развитие современных систем управления с участием человека характеризуется двумя противоречивыми направлениями. С одной стороны человек все более исключается из непосредственного управления машинами и механизмами, и автоматические системы выполняют все больший объем рутинных для человека действий. С другой стороны за человеком остаются все более важные, требующие высокого интеллекта и уровня подготовки, функции по принятию существенных, часто финальных, решений управления. Как следствие - «человеческий фактор»  $(\Psi\Phi)$ , выходит на первый план в вопросах обеспечения безопасности на транспорте [8].

Человеческий фактор на транспорте проявляется в неадекватных действиях операторов подвижных объектов (ПО) во время движения, или же в неграмотных действиях или халатном отношении работников служб обеспечивающих безопасность движения. Перечисленные причины в критических ситуациях приводят к возникновению аварий или катастроф [6].

Система управления подвижным транспортным объектом является человеко-машинной и состоит из регулятора, в состав которого входит оператор (вахтенный судоводитель, пилот, машинист), и объекта регулирования, которым является транспортное средство [7]. На систему управления воздействуют как внешние дестабилизирующие факторы (на-

2. Человеческий фактор при управлении пример, изменяющаяся навигационная обстановка, решение задач предотвращения столкновений, изменение погодных условий), так внутренние (энергонасыщенность, прочность, инерционность объекта, отказы элементов управляющих систем и др.) (рис.3). К внутренним дестабилизирующим факторам, влияющим на качество работы системы, относится также психофизиологическое состояние оператора к моменту принятия решения.

> Между внутренними и внешними факторами существуют взаимосвязи, их характер непрерывно изменяется, и они с течением времени в различной степени влияют на качество работы системы управления подвижным объ-

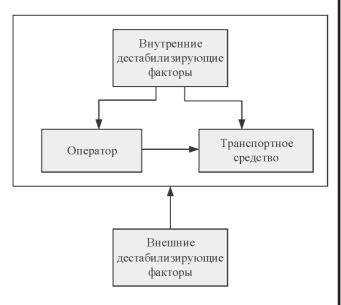


Рис.3. Воздействие дестабилизирующих факторов на подвижной объект.





влияют:

- а) полнота исходной информации для принятия решения;
  - б) личностные характеристики оператора;
- в) эргономичность системы управления ПО.

Любое принятое оператором решение по управлению объектом носит субъективный характер и заранее формализовать логику его принятия невозможно. Пока что, не представляется возможным заранее выработать правидолжен руководствоваться оператор в различных обстоятельствах. "Законы поведения" влияют как на логическое мышление человека, так и на время принятия им решения. При построении систем контроля состояний ПО необходимо проводить исследования, которые бы позволяли достаточно полно учитывать законы поведения человека.

Влияние ЧФ на систему управления ПО возможно учитывать посредством непрерывного контроля его физического состояния, а также сбором и анализом статистических данв аварийных ситуациях.

Методы и инструментальные средства современных медицинских технологий позволяют эффективно выполнять наблюдения за состоянием человека. Особое внимание привлеоценки состояний, основанных на принципах возможностей при работе в стрессовой ситуаслежения за системными показателями организма. К подобным показателям можно отнести характеристики протекания регуляторных позволяет также разработать рекомендации процессов в физиологических системах орга- по режиму труда и отдыха, длительности рабонизма и, в частности, показатели активности чей смены, частоты профилактических осмотпроцессов вегетативной регуляции в сердечно-сосудистой системе.

интервалов (чаще всего R-R интервалов ЭКГ), измерения их длительностей и проведения масометрия [10]). Динамические характеристики вижного объекта и его экипажа. Одновремен-

ектом. На качество принятого оператором ре- ритма сердца позволяют оценить выраженшения по управлению подвижным объектом ность сдвигов симпатической и парасимпатической активности вегетативной нервной системы при изменении состояния наблюдаемого индивида. Активность вегетативной регуляции проявляется в изменении показателей хронотропной структуры сердечного ритма. Математические методы анализа длительностей межпульсовых интервалов, следующих друг за другом, обнаруживает вариабельность сердечного ритма - изменчивость интервалов друг относительно друга. Изменение вариабельности сердечного ритма связано ла (законы) логического мышления, которыми интенсивностью процессов активации отделов вегетативной нервной системы по отношению к сердечно-сосудистой системе и позволяет судить о степени адаптационной реакции организма на то или иное воздействие в целом. Оценка вариабельности сердечного ритма показала большие потенциальные возможности в распознавании состояний функционального напряжения и перенапряжения, предшествующего развитию болезни. Это позволяет также оценить адаптационные способности оператора на конкретном этапе его деятельности в различных условиях: смещение рабочего ных о поведении операторов ПО, оказавшихся времени «вечер-ночь»; переменная цикличность (дальние поездки; физические и психические напряжения, дефицит времени и т.п.).

Обработка показателей в реальном времени позволяет решить вопрос о возможностях адаптации оператора в каждом конкретном кает использование методик прогностической случае, наличие или отсутствие резервных ции (ночное время, сложный участок пути, экстренное торможение). Данная методика ров.

Анализ статистических данных о поведе-Ритм сердечных сокращений является на- нии операторов, оказавшихся в аварийных иболее доступным для регистрации физиоло- ситуациях позволяет определить среднестагическим параметром, отражающим процессы тистические законы поведения, и на этой вегетативной регуляции в сердечно-сосудис- основе выработать корректуру их действий за той системе. Динамические характеристики счет индивидуальных особенностей операторитма сердца определяются путем регистра- ров, или путём моделирования различных сиции последовательного ряда межпульсовых туаций с использованием тренажеров по управлению подвижным объектом.

Задача проведения эксперимента на третематической обработки динамического ряда нажерах состоит в выявлении законов поведеполученных значений для вычисления диаг- ния и их влияния на принятие решения операностических показателей (вариационная пуль-тором, определяющего безопасность под-





но должна решаться задача определения несоответствия существующих правил естественным (инструкций) законам поведения человека и при необходимости их коррекция. Для минимизации действия ЧΦ на результат управления транспортным средством целесообразно применять: а) результаты вероятностной обработки множества моделей поведения; б) количественная оценка степени уверенности минимизации влияния ЧФ на безопасность транспортного средства (нормирование ЧФ); в) адаптивная коррекция динамических характеристик регулятора в соответствии с психофизиологическим состоянием оператора.

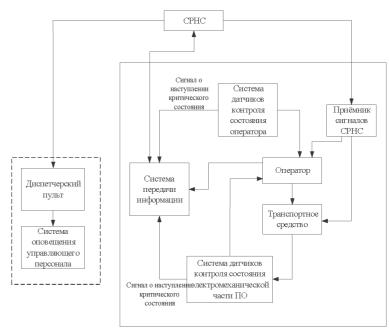


Рис.4. Система контроля возникновения критических состояний на управляемых человеком транспортных средствах.

# 3. Технические средства предотвращения критических состояний на транспорте.

Использование дополнительных технических средств, таких, как приборы медицинской диагностики операторов транспортных средств, интеграция с глобальными спутниковыми радионавигационными системами, построение систем контроля возникновения критических состояний в системе человек-машина, приведёт к снижению риска возникновения аварийных ситуация.

В общем случае система контроля возникновения критических состояний на управляемых человеком подвижных объектах, может выглядеть следующим образом (рис.4):

Состояние системы оператор-машина постоянно анализируется комплексом датчиков. Информация о состоянии транспортного средства передаётся на пульт управления оператора, так же эта информации в любой момент времени может быть запрошена с диспетчерского пункта. Датчики контроля состояния оператора постоянно анализируют его состояние, в случае резких критических изменений 3. показаний, на диспетчерский пункт поступает сигнал тревоги. Постоянный контроль местоположения ПО осуществляется посредством глобальных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) или систем обеспечивающих определение местоположение ПО с прищих определение местоположение ПО с при

емлемой точностью. Система передачи данных может быть построена, как на основе наземных проводных систем передачи данных, систем радиосвязи, так и на основе системы навигационных космических аппаратов многоцелевого назначения [9].

Применение систем контроля построенных по подобному принципу обеспечивает: получение в реальном масштабе времени достоверной информации как только о транспортном средстве, так и о состоянии оператора, постоянный контроль местоположения ПО, своевременное информирование о наступлении аварийной ситуации о ее координатах, информирование о ЧС менеджеров всех уровней.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- 1. Аварии при транспортировке. Анализ причин инцидентов // М.: Эпицентр, 2003. 215c.
- 2. Белов С.В., Девисилов В.А. и др. Безопасность жизнедеятельности // М.: Высшая школа, 2002. 326с.
- 3. http://www.petrozavodsk-mo.ru/html/upload/go4-1.doc.
- 4. В. Г. Атаманюк, Л. Г. Ширшев, Н. И. Акимов. Гражданская оборона // М.: Высшая Школа, 1986. 431с.
- 5. Медико-тактическая характеристика железнодорожных катастроф // Конспекты





- по обязательной 35 -часовой программе обучения врачей и средних медицинских работников по вопросам гражданской обороны, http://www.belkmk.narod.ru/ ironroad.htm
- 6. Волкова И.В, Калинина Е.В, Осадчая О.Н, 9. Витвинская Е.Ю. «Человеческий фактор»: критерии оценки профдеятельности в безопасности// культуре НПЦ 2004. «Прогноз-Петербург», http://www.proatom.ru.
- 7. А.Е.Сазонов Человеческий фактор и безопасность управления подвижными объек-

- тами // Сборник материалов XVI Общего собрания академии навигации и управления движением, 23.10.2003. — С. 33-39.
- Бугай В.И. Доклад на заседании коллегии ΦCHT, 6.06.2007 // http://www.aviafond.ru
- Соловьёв Ю.А Спутниковая навигация и её приложения // Эко-Трендз 2003г, 322 с.
- 10. Газенко О.Г., Баевский Р.М. Физиологические методы в космической медицине // Искусственные спутники Земли. - 1963. -Вып. 11. - С. 67-73.

Елисеев С. В., Упырь Р.Ю.

УДК. 621.01

# ОСОБЕННОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МЕХАНИЧЕСКИХ

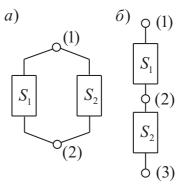
систем являются отправной точкой исследования, в ходе которого определяются параметры динамического состояния, необходимые для оценки показателей надежности и безопасности работы, прогноза надежности и устойчивости функционирования оборудования приборов и аппаратуры. Механические цепи, как показано в работах [1,2,3], являются важными элементами колебательных систем и рассматриваются как дополнительные связи, принимающие в зависимости от конкретных обстоятельств те или иные конструктивно-техцепи входят между собой в типовые соединения, среди которых наиболее применяемыми и известными являются параллельные и последовательные, как это показано на рис.1а,б.

Отметим, что при образовании соединения элементов с передаточными функциями  $S_1$  и  $S_2$ , можно рассматривать точки 2 на рис. 1 $\alpha$ и 16, как место совпадения или совмещения двух точек, каждая из которых принадлежит одному из входящих в контакт звеньев. В этом случае можно предполагать, что обычное соединение относиться к тому случаю, когда параметры соединения, как некоторого особого Рис.1. Два вида типовых соединений: параллельпроцесса, осуществляемого специальным эле- ное (а) и последовательное (б).

В решении задач динамики расчетные ментом или звеном, носят нулевой характер. схемы в виде механических колебательных Однако при других обстоятельствах эти параметры могут быть и не равным нулю, а сам носитель функции соединения, если иметь в виду его физическое представление, может рассматриваться, например, как невесомый стержень, рычаг или, что такое возможно - как специальное звено, обладающее своими параметрами состояния.

> При параллельном соединение, если иметь в виду рычажное соединение, то схема на рис.1a преобразуется к виду, как показано на рис.2a, $\delta$ ,B.

«Разнос» точек на рис.2a, $\delta$ ,B обеспечиванические формы [4]. Элементы механической ется безынерционным (в данном случае) рыча-







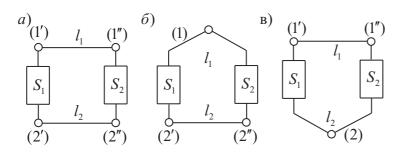


Рис.2. Возможные формы соединений в точке 2 при введении промежуточной связи: задействованы точки 1 и 2 (а); задействована точка 2 (б); задействована точка 1 (в).

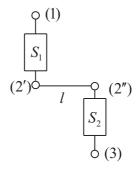


Рис.3. Введение невесомого стержня в последовательное соединение (соответствующая рис.1а).

гом, который не имеет точки опоры. Однако, такая связь может быть реализована, если элементы  $S_1$  и  $S_2$ , 1', 1'', 2',2'' обеспечат определенное количество связей, позволяющих в том числе ввести в рассмотрение рычаг с инерционными свойствами.

Если рассматривать соединения, приведенные на рис.1a,  $\delta$ , то параметры элемента при «сворачивании» схемы определятся при параллельном соединении:

$$S = S_1 + S_2, \tag{1}$$

при последовательном -

$$S = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2},\tag{2}$$

а точка (2) уходит в сворачиваемую схему. При этом схема с введением рычага в последовательное соединение имеет вид в соответствии с рис.3.

I. Рассмотрим параллельное соединение, его возможные трансформации при введении рычажных соединений, как это показано на рис.4a-ж.

При введении, по-существу, специального который реализует функцию «расцепления» соединения, естественно возникает вопрос о том, как это практически может осуществляться, невесомые стержни длиной  $l_1$  и  $l_2$ , введенные на схемах (рис. $2a_i\delta_i B$ ) и рис.3, не позволяет получить регуляризованные или упорядоченные движения в соединении, вносят в него хаотичность. В этом случае можно, видимо, предполагать, что такое обстоятельство можно учесть и отобразить через введение нелинейной связи типа «люфт». Реализация этой связи через некоторое звено, выполняющего функцию соединения, имеющего случайные свойства, потребует определенной детализации, то есть задания длины l.

Обеспечение свойства упорядоченности движения можно соотнести с введением точки неподвижной опоры для невесомого стержня, который превращается в этом случае в рычаг и обеспечивает рычажную форму параллельного соединения.

Безусловно, наличие необходимой точки опоры для звена, реализующего функцию соединения, изменяет «качество» соединения, которое находит соответствующее отображе-(1) ние в динамических свойствах системы, в целом. Однако, при определенных обстоятельствах - симметричность рычага, совпадение точек соединения, обычный вид параллельного соединения можно рассматривать как частный случай предлагаемого подхода. Обратим внимание на одну характерную деталь соединения, которое несет на себе не только масштабное изменение взаимодействия элементов  $S_1$  и  $S_2$  (масштабирование), но и в определенных условиях - изменение знака. Последнее обстоятельство было отмечено в работе [5], а понятие невесомого стержня или безынерционного рычага рассматривалось в работе [6].

Учет инерционных свойств элемента, реализующего функцию соединения элементов, приводит к иным схемам взаимодействия, которые существенным образом изменяют динамические свойства системы, однако принимая массоинерционные параметры, равные нулю, можно получить рассмотренные на рис.4a-ж, как частные случаи. Учет массоинерционных свойств рычага позволяет ввести в рассмотрение еще одну характерную деталь, которая связана с предположением скользящей точки опоры рычага. В таком случае реализация функции параллельного соединения двух звеньев может осуществляться без связи с неподвижным основанием. В этом случае основной параметр рычага - передаточное отношение будет иметь отличные от невесомого стер-





и соответствующим моментом инерции, необходимо особое внимание уделить возможностям физической осуществимости условий

$$J \neq 0, M = 0; J = 0, M \neq 0; J \neq 0,$$
  
 $M \neq 0; J = 0, M = 0.$  (3)

И, наконец, точка опоры невесомого стержня (рычага) и весомого (в том числе) может быть связана не с неподвижным основанием, а темы. Например, точка опоры может принадлежать пружине (упругий элемент), промежуточной массе, в свою очередь, опертой на упругий элемент и т.д.

Завершая рассмотрение возможных видов реализаций функций «соединения» как особой «процедуры» параллельного соединения элементов  $S_1$  и  $S_2$ , можно говорить о направлении исследования, которое вполне может развиваться автономно в предположении, что рычажные взаимодействии найдут отражение в построении соответствующих технологий (или алгоритмов) оценки динамических свойств механических колебательных систем. Рассмотрим последовательно возможности соединений, представленных на рис.4a-ж, данные исследований сведем в таблицы 1-7 (см.

жня, зависящие от частот взаимодействия ха- Приложение). Если считать, что нижний рычаг рактеристики. Для весомого рычага, как твер- неподвижен (рис. 4а и 4б), то схемы преобразудого тела в виде балки, обладающего массой M ются  $\kappa$  виду соединения элементов рычагом первого и второго рода, соответственно.

> II. <u>Теорема об инвариантности коэффици-</u> ента приведенной жесткости системы. Доказательство теоремы приведем на примере колебательной системы, представленной на рис.4а.

Определение. Коэффициент приведенс точкой соединения от другого элемента сис- ной жесткости не меняет своего значения, при изменении точки приложения силы в колебательной системе, представленной на рис.4.а.

> Чтобы найти коэффициент приведенной жесткости, запишем передаточные функции, для всех случаев приложения силы (для схемы, представленной на рис.4а). Вначале отметим, что передаточные функции, при приложении силы в определенных точках, выразить не представляется возможным, ввиду того, что при алгебраических преобразованиях точки приложения силы на структурной схеме как бы сворачиваются во внутрь выражения и не подлежат выделению:

$$W_{2} = \frac{y_{1}}{P_{1''}}, W_{3} = \frac{y_{1}}{P_{2''}}, W_{5} = \frac{y_{2}}{P_{1'}}, W_{7} = \frac{y_{2}}{P_{2'}}, W_{10} = \frac{y_{3}}{P_{1''}}, W_{12} = \frac{y_{3}}{P_{2''}}, W_{13} = \frac{y_{4}}{P_{1'}}, W_{15} = \frac{y_{4}}{P_{2'}}$$

$$(4)$$

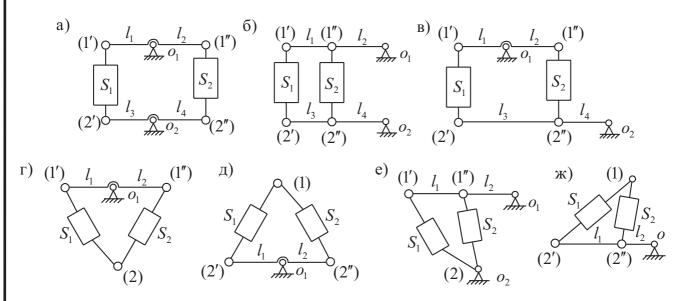


Рис.4. Возможные формы параллельного соедине  $S_1$  и  $S_2$  при использовании невесомого стержня (рычага) с опорой на неподвижное основание: а) точки 1 и 2 «разносятся» рычагом 1-го рода; б) точки 1 и 2 «разносятся» рычагами 2-го рода; в) точка 1 «разносится» рычагом 1-го рода, точка 2 – рычагом 2-го рода; г) точка 1 «разносится» рычагом 1-го рода, в точке 2 – обычное соединение; д) точка 2 «разносится» рычагом 2-го рода, в точке 1 – обычное соединение; е) точка 1 «разносится» рычагом 1-го рода, в точке 2 – обычное соединение; ж) точка 2 «разноситься» рычагом 1-го рода, в точке 1 – обычное соединение.





Найдем возможные варианты передаточных функций:

$$W_{1} = \frac{y_{1}}{P_{1'}} = \frac{l_{1}^{2}}{\Im - \left[k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}\frac{l_{1}l_{2}l_{4}}{l_{3}}\right] \cdot \left[k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}\frac{l_{2}l_{3}l_{4}}{l_{1}}\right]}; \quad (5)$$

$$W_{4} = \frac{y_{1}}{P_{2'}} = \frac{\left(J_{2}p^{2} + k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}l_{4}^{2}\right) \cdot \left[k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}\frac{l_{1}l_{2}l_{4}}{l_{3}}\right] \cdot l_{1}^{2}}{\Im - \left[k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}\frac{l_{1}l_{2}l_{4}}{l_{3}}\right] \cdot \left[k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}\frac{l_{2}l_{3}l_{4}}{l_{1}}\right]}; \quad (6)$$

$$W_{6} = \frac{Y_{2}}{P_{1''}} = \frac{l_{2}^{2}}{\Im - \left[ k_{1} \frac{l_{1} l_{2} l_{3}}{l_{4}} + k_{2} l_{2}^{2} \right] \cdot \left[ k_{1} \frac{l_{1} l_{3} l_{4}}{l_{2}} + k_{2} l_{4}^{2} \right]}; \quad (7)$$

$$W_{8} = \frac{Y_{2}}{P_{2"}} = \frac{\left[k_{1} \frac{l_{1} l_{2} l_{3}}{l_{4}} + k_{2} l_{2}^{2}\right] \cdot l_{2}^{2}}{\Im - \left[k_{1} \frac{l_{1} l_{2} l_{3}}{l_{4}} + k_{2} l_{2}^{2}\right] \cdot \left[k_{1} \frac{l_{1} l_{3} l_{4}}{l_{2}} + k_{2} l_{4}^{2}\right]}; \tag{8}$$

$$W_{9} = \frac{y_{3}}{P_{1'}} = \frac{\left(J_{1}p^{2} + k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}l_{2}^{2}\right) \cdot \left[k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}\frac{l_{2}l_{3}l_{4}}{l_{1}}\right] \cdot l_{1}^{2}}{\Im - \left[k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}\frac{l_{1}l_{2}l_{4}}{l_{3}}\right] \cdot \left[k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}\frac{l_{2}l_{3}l_{4}}{l_{1}}\right]}; \quad (9)$$

$$W_{11} = \frac{y_3}{P_{2'}} = \frac{l_1^2}{\Im - \left[ k_1 l_1^2 + k_2 \frac{l_1 l_2 l_4}{l_3} \right] \cdot \left[ k_1 l_3^2 + k_2 \frac{l_2 l_3 l_4}{l_1} \right]}; \quad (10)$$

$$W_{14} = \frac{y_4}{P_{1''}} = \frac{\left(J_2 p^2 + k_1 l_3^2 + k_2 l_4^2\right) \cdot \left[k_1 \frac{l_1 l_3 l_4}{l_2} + k_2 l_4^2\right] \cdot l_2^2}{\Im - \left[k_1 \frac{l_1 l_2 l_3}{l_4} + k_2 l_2^2\right] \cdot \left[k_1 \frac{l_1 l_3 l_4}{l_2} + k_2 l_4^2\right]}; \quad (11)$$

$$i_2 = \frac{l_2}{l_1}, \text{ и получим окончательный вид для при-веденного коэффициента жесткости данной динамической системы:}$$

$$W_{16} = \frac{y_2}{P_{2''}} = \frac{I_2^2}{\Im - \left[ k_1 \frac{I_1 I_2 I_3}{I_4} + k_2 I_2^2 \right] \cdot \left[ k_1 \frac{I_1 I_3 I_4}{I_2} + k_2 I_4^2 \right]}, (12)$$

где 
$$\Im = (J_1 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) \cdot (J_2 p^2 + k_1 l_3^2 + k_2 l_4^2).$$

Из полученных соотношений (5)÷(12) можно выделить частотные уравнения, которые имеют вид:

для случаев 
$$W_1 - W_4$$
 и  $W_9 - W_{12}$ : 
$$\left(J_1 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2\right) \cdot \left(J_2 p^2 + k_1 l_3^2 + k_2 l_4^2\right) - \left[k_1 l_1^2 + k_2 \frac{l_1 l_2 l_4}{l_3}\right] \cdot \left[k_1 l_3^2 + k_2 \frac{l_2 l_3 l_4}{l_1}\right] = 0.$$
 (13)

или после некоторых преобразований:

$$J_{1}J_{2}p^{4} + J_{1}p^{2}(k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}l_{4}^{2}) + J_{2}p^{2}(k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}l_{2}^{2}) + k_{1}k_{2}(l_{2}l_{3} - l_{1}l_{4})^{2} = 0.$$

$$(14)$$

для случаев  $W_{\scriptscriptstyle 5}$  – $W_{\scriptscriptstyle 8}\%$  и  $W_{\scriptscriptstyle 13}$  – $W_{\scriptscriptstyle 16}$  частотное равнение примет вид:

$$\left(J_{1}p^{2} + k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}l_{2}^{2}\right) \cdot \left(J_{2}p^{2} + k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}l_{4}^{2}\right) - \left[k_{1}\frac{l_{1}l_{2}l_{3}}{l_{4}} + k_{2}l_{2}^{2}\right] \cdot \left[k_{1}\frac{l_{1}l_{3}l_{4}}{l_{2}} + k_{2}l_{4}^{2}\right] = 0.$$
(15)

или после преобразований, получим:

$$J_{1}J_{2}p^{4} + J_{1}p^{2}\left(k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}l_{4}^{2}\right) + J_{2}p^{2}\left(k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}l_{2}^{2}\right) + k_{1}k_{2}\left(l_{2}l_{3} - l_{1}l_{4}\right)^{2} = 0.$$

$$(17)$$

Определим из частотного уравнения коэффициент приведенной жесткости. Для этого преобразуем выражение (17) к виду

$$\frac{J_{1}J_{2}p^{4}}{\left(k_{1}l_{3}^{2}+k_{2}l_{4}^{2}\right)+\left(k_{1}l_{1}^{2}+k_{2}l_{2}^{2}\right)}+J_{1}p^{2}+J_{2}p^{2}+\frac{k_{1}k_{2}\left(l_{2}l_{3}-l_{1}l_{4}\right)^{2}}{\left(k_{1}l_{3}^{2}+k_{2}l_{4}^{2}\right)+\left(k_{1}l_{1}^{2}+k_{2}l_{2}^{2}\right)}=0.$$
(18)

Будем считать, что рычаг безынерционным ( $J_1 = 0$  и  $J_2 = 0$ ), тогда выражение (18) принимает вид приведенного коэффициента жес-

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}(l_{2}l_{3} - l_{1}l_{4})^{2}}{(k_{1}l_{3}^{2} + k_{2}l_{4}^{2}) + (k_{1}l_{1}^{2} + k_{2}l_{2}^{2})}.$$
 (19)

Введем следующие обозначения:  $i_1 = \frac{I_2}{I}$  и

динамической системы:

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}(i_{1} - i_{2})^{2}}{k_{1} + k_{2}(i_{1}^{2} + i_{2}^{2})}.$$
 (20)

Таким образом в какой точке системы не прикладывалась бы внешняя сила, коэффициент приведенной жесткости системы остается постоянным. Что и требовалось доказать. Отметим также, что в какой бы системе обобщенных координат не рассматривалась колебательная система, представленная на рис.4а, коэффициент приведенной жесткости не меняет своего значения.

Доказательством данной части теоремы об инвариантности приведенного коэффициента жесткости системы являются расчетные данные, приведенные в таблица 2 (см. Приложение), где рассмотрена расчетная схема в различных системах координат.

III. Следует отметить, что для расчетных схем, рассмотренных в приложении (табл. 1 -8), коэффициент приведенной жесткости системы для всех случаев, приведенных на (15) рис.4а,4б,4в, принимает вид:





$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}(i_{1} - i_{2})^{2}}{k_{1} + k_{2}(i_{1}^{2} + i_{2}^{2})}.$$
 (21)

Хотя в данном выражении передаточное отношение рычага  $i_1$ ,  $i_2$  могут отличаться, это зависит от того, рычаг первого или второго рода рассматривается в колебательной системе. Необходимо отметить, что выражение (21) имеет вид последовательного соединения пружин  $k_1$  и  $k_2$  с учетом особенностей, появляющихся при введении рычажных соотношений. Если рычаг является симметричным, то есть  $i_1 = i_2$ ,  $l_1 = l_3$  и  $l_2 = l_4$ , то выражение (21) из вида последовательного соединения пружин, преобразуется к виду параллельного соединения с учетом особенностей введения рычажных связей. Данное соотношение получим из частотного уравнения, подставив в него симметричные передаточные отношения. Тогда выражение для приведенного коэффициента жесткости примет вид:

$$K_p = k_1 + k_2 \left( i_1^2 + i_2^2 \right), \tag{22}$$

или при обозначении  $i_1=i_2=i$  -  $K_p=k_1+2k_2i^2\,.$ (23)

Если в такой системе все плечи рычагов равны между собой, то выражение (23) преобразуется к виду

$$K_{-} = k_{1} + 2k_{2}; (24)$$

 $K_{_{p}}=k_{_{1}}+2k_{_{2}};$  при  $k_{_{1}}=k_{_{2}}=k$  - получим соответственно:  $K_{_{p}}=3k.$ 

$$K_{n} = 3k. \tag{25}$$

Для расчетных схем (рис.4г,4е) коэффициент приведенной жесткости системы для всех случаев принимает вид:  $K_{_{p}}=k_{_{1}}+k_{_{2}}\,j^{_{2}}i^{_{2}}\,,$ 

$$K_{p} = k_{1} + k_{2} j^{2} i^{2}, (26)$$

что соответствует последовательному соединению пружин с учетом особенностей введения рычажных связей. Для расчетных схем (рис.4д,4ж) коэффициент приведенной жесткости системы для всех случаев, соответственно получим как

$$K_{p} = \frac{k_{1}k_{2}(i \cdot \rho - j)^{2}}{k_{1} + k_{2}i^{2} \cdot j^{2} \cdot \rho^{2}}.$$
 (27)

В данном случае (27) соответствует виду последовательного соединения пружин и имеет те же особенности, что и для выражения (21), но надо принять во внимание появление дополнительных особенностей из-за учета углов установки пружин.

В заключении отметим:

1. В механических колебательных системах при введении рычажных соотношений

возникают некоторые особенности, позволя-(21) ющие с помощью изменения рычажных соотношений изменять динамические свойства

- 2. При «полной симметрии» системы получаем еще одну дополнительную жесткость при параллельном соединении пружин.
- 3. В любой колебательной системе такого «разнесении», при коэффициент приведенной жесткости системы будет зависеть только от параметров рычага и упругостей, и остается постоянным не зависимо от точек приложения сил и выбора системы координат.
- 4. При расчете в обобщенных координаперемещению появляется явная несимметрия в цепи прямой и обратной связи.

### **ВИФАЧТОИЛАНА**

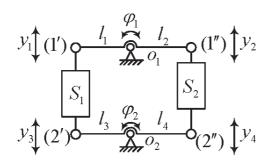
- Хоменко А.П., Банина Н.В. Структурные методы динамического синтеза колебательных механических систем с учетом особенностей физических реализаций обратных связей //Современные техноло-Системный анализ. Моделирование//Вып ИрГУПС. 4(12). Иркутск.2006.-С.6-22.
- Елисеев С.В., Засядко А.А., Упырь Р.Ю. Новый подход в оценке возможностей последовательного соединения элементов в структурных интерпретациях механических колебательных систем//Современные технологии. Системный анализ. Моделирование//Вып 1(13).ИрГУПС. Иркутск. 2007. -C.88-99.
- Димов Д.В., Елисеев С.В., Хоменко А.П. Обобщение задач виброзащиты и виброизоляции на основе структурных методов математического моделирования //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование//Вып2(10).ИрГУПС. Иркутск. 2006.-С.6-12.
- Eliseev S.V., Lukyanov A.V., Reznik Yu.N, Khomenko A.P. Dynamics of mechanical systems with additional ties. Publishing of Irkutsk State University of Railway Engineering. Irkutsk. - 2006. pp.316.
- Гальперин И.Н. Автоматика как односторонняя механика. Издательство шиностроение». Москва. 1964. 248с.
- Дружинский И.А. Механические цепи. Издательства «Машиностроение». 1977. 238c.



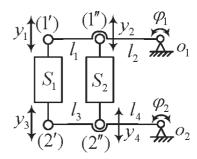


Табл. 1

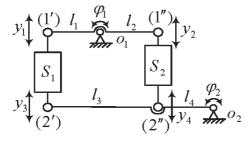
# Расчетные схемы для определения значений приведенных жесткостей при параллельном соединении с «разнесением»



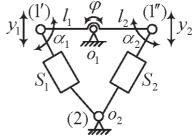
Расчетная схема (обозначения) для рис.4a.



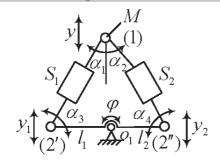
Расчетная схема (обозначения) для рис.4б.



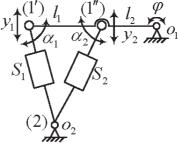
Расчетная схема (обозначения) для рис.4в.



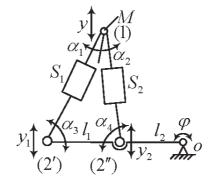
Расчетная схема (обозначения) для рис.4г.



Расчетная схема (обозначения) для рис.4д.



Расчетная схема (обозначения) для рис.4e.



Расчетная схема (обозначения) для рис.4ж.



# Значения приведенных жесткостей при параллельном соединении с «разнесением» для случая представленного на рис.4а

) = 0 () =	$a = a_1 = k_1 l_3 + k_2 l_2 l_4, b_1 = J_1 p^2,$ $c_1 = J_2 p^2, b_2 = k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2,$ $c_2 = k_1 l_3^2 + k_2 l_4^2, i_1 = \frac{l_2}{l_1}, i_2 = \frac{l_4}{l_3},$ $b = J_1 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2,$ $c = J_2 p^2 + k_1 l_3^2 + k_2 l_4^2.$ $IIpmeqahix$ $a_1 = k_1 l_1^2 + k_2 \frac{l_1 2 l_4}{l_3}, a_2 = k_1 l_3^2 + k_2 \frac{l_2 l_3 l_4}{l_1},$ $b = J_1 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2, i_1 = \frac{l_2}{l_1},$ $c = J_2 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2, i_2 = \frac{l_4}{l_1}.$
(a) = 0	
Значения приведенной жес $\frac{1}{a^2}.$ $K_{\eta p} = \frac{k_1 k_2 \left(i_1 - i_2\right)^2}{k_1 + k_2 \left(i_1 + i_2\right)^2}.$ пий Структурная схема $\frac{1}{k_1 l_2^2 + k_2} \frac{1}{l_1^2 l_4}$ $= P \cdot l_1^2$ $= 0$ $\frac{1}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}$ Значения приведенной жес	
$\frac{a^2}{a^2}.$ $K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1 + i_2)^2}.$ пий $Cтруктурная схема$ $= P \cdot l_1^2$ $= \frac{1}{k_1 l_2^2 + k_2 l_2^2}$ $= 0$ $\frac{1}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}$ $= 0$ Значения приведенной жес	- A
іий Структурная схема $ = P \cdot l_1^2 $ $ = P \cdot l_1^2 $ $ = 0 $	2
$= P \cdot l_1^2$ $= 0$ $\begin{cases}                                    $	
$= 0$ $ \frac{1}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}                                   $	~~~
$=0$ $\sqrt{k_1l_1^2 + k_2l_2^2} \int^{-r_1} \int \sqrt{k_1}  dk_2  dk_2  dk_2  dk_2  dk_3  dk_4  $	~
,	
$W_1 = \frac{y_1}{P} = \frac{l_1^2}{b \cdot c - a_1 a_2};  W_2 = \frac{y_3}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot l_1^2}{b \cdot c - a_1 a_2}.$ $K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1 + i_2^2)}.$	
Координаты $y_2$ , $y_4$ $k_1 \frac{l_1 l_1^2 l_4}{l_1} + k_2 l_4^2$	$a_1 = k_1 \frac{l_1 l_2 l_3}{l} + k_2 l_2^2, a_2 = k_1 \frac{l_1 l_3 l_4}{l} + k_2 l_4^2,$
$J_1\ddot{y}_2 + y_2 \left( k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 \right) - y_4 \left( k_1 \frac{l_1 l_3}{l_4} + k_2 l_2^2 \right) = P \cdot l_2^2$	$b = J_1 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2, \ i_1 = \frac{l_2}{l},$
$J_2\ddot{y}_4 + y_4 \left( k_1 l_3^2 + k_2 l_4^2 \right) - y_2 \left( k_1 \frac{l_1 s_4}{l_2} + k_2 l_4^2 \right) = 0 \qquad \sqrt{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2} \int_{\mathcal{Y}_2} y_2 \left( k_1 \frac{l_1 s_4}{l_2} + k_2 l_4^2 \right) = 0$	, Y,
Передаточные функции Значения приведенной жесткости	2
$W_1 = \frac{y_2}{P} = \frac{l_2^2}{b \cdot c - a_1 a_2};  W_2 = \frac{y_4}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot l_2^2}{b \cdot c - a_1 a_2}.$ $K_{np} = \frac{k_1 k_2 \left(i_1 - i_2\right)^2}{k_1 + k_2 \left(i_1^2 + i_2^2\right)}.$	







Табл.3. Значения приведенных жесткостей при параллельном соединении с «разнесением» для случая представленного на рис.46

$ \begin{pmatrix} (_3+l_4)+k_2l_2l_4 ) = 0 \\ (l_3+l_4)+k_2l_2l_4 ) = 0 \\ \mathbf{R} $ $ \begin{pmatrix} a \\ b \\ c - a^2 \end{pmatrix} $ $ \begin{pmatrix} a \\ b \\ c - a^2 \end{pmatrix} $ $ \begin{pmatrix} a \\ b \\ c - a^2 \end{pmatrix} $ $ \begin{pmatrix} A \\ p \\ b \\ c - a^2 \end{pmatrix} $ $ \begin{pmatrix} A \\ p \\ b \\ c - a^2 \end{pmatrix} $ $ \begin{pmatrix} A \\ p \\ b \\ c \\ c$	ž	Система дифференциальных уравнений	Структурная схема	Примечания
$\begin{cases} J_1 \hat{\phi}_1 + \varphi_1 \left(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_3^2\right) - \varphi_1 \left(k_1 (l_1 + l_2) k_1 + k_2 l_3 l_3\right) = 0 \\ J_2 \hat{\phi}_2 + \varphi_2 \left(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_3^2\right) - \varphi_1 \left(k_1 (l_1 + l_2) k_1 + k_2 l_3 l_3\right) = 0 \\ M_1 = \frac{\varphi_1}{M} = \frac{\varphi_2}{h} = \frac{b}{b \cdot c - a^2};  W_2 = \frac{a}{M} = \frac{a}{b \cdot c - a^2}. \\ \text{Система дифференциальных уравнений } \\ \text{Система дифференциальных функции } \\ \text{Система диференциальных функции } \\ \text{Система дифференциальных функции } \\ \text{Система диференциальных функции } \\ \text{Передаточных функции } \\ Передаточных функции$	1.	Координаты $\varphi_1, \varphi_2$		$a = a_1 = k_1(l_1 + l_2)(l_3 + l_4) + k_2l_2l_4$
		$\int J_1 \vec{\varphi}_1 + \varphi_1 \left( k_1 \left( l_1 + l_2 \right)^2 + k_2 l_2^2 \right) - \varphi_2 \left( k_1 \left( l_1 + l_2 \right) \left( l_3 + l_4 \right) + k_2 l_2 l_4 \right) = 0$		$b_1 = J_1 p^2, c_1 = J_2 p^2,$
Передаточные функции $W_1 = \frac{Q_1}{M} = \frac{b}{b \cdot c - a^2} : W_2 = \frac{a}{M} = \frac{b}{b \cdot c - a^2}.$ Система дифференциальных уравнений $C$ Сирема дифференциальных уравнений и согности передаточных функции $C$ Сирема дифференциальных уравнений и согности передаточных функции $C$ Сирема дифференциальных уравнений и согности $C$ Сирема дифференциальных уравнений (Сифференциальных уравнений (Сифференциальных уравнений (Сифф		$\left[J_{2}\ddot{\varphi}_{2}+\varphi_{2}\left(k_{1}\left(l_{3}+l_{4}\right)^{2}+k_{2}l_{4}^{2}\right)-\varphi_{1}\left(k_{1}\left(l_{1}+l_{2}\right)\left(l_{3}+l_{4}\right)+k_{2}l_{2}l_{4}\right)=0\right]$		$b_2 = k_1(l_1 + l_2) + k_2l_2^2,$ $c_2 = k_1(l_3 + l_4)^2 + k_2l_4^2,$
$W_1 = \frac{Q_1}{M} = \frac{b}{b \cdot c - a^2}; W_2 = \frac{a}{M} = \frac{a}{b \cdot c - a^2}.$ Система дифференциальных уравнений бординаты $y_1, y_2$ $\begin{cases} J_1\ddot{y}_1 + y_1 \left(k_1(l_1 + l_2) + k_2 l_2^2\right) - y_2 \left(k_1(l_1 + l_2) + k_2 l_2^2\right) - y_3 \left(k_1(l_1 + l_2) + k_2 l_2^2\right) - y_3 \left(k_1(l_1 + l_2) + k_2 l_2^2\right) - y_3 \left(k_1(l_1 + l_2) + k_2 l_3^2\right) - y_3 \left(k_1(l_$		Передаточные функции	Значения приведенной жесткости	$i_1 = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \ i_2 = \frac{l_4}{l_3 + l_4},$
Система дифференциальных уравнений координаты $y_1$ , $y_2$ (сординаты $y_1$ , $y_2$ ) (сординаты $y_1$ , $y_2$ ) (сординаты $y_2$ , $y_3$ ) (сординаты $y_3$			$K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1^2 + i_2^2)}.$	$b = J_1 p^2 + k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2$ $c = J_2 p^2 + k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_4^2$
Координаты $y_1, y_3$ $\begin{cases} J_1 \ddot{y}_1 + y_1 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_2 + l_4)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2 \Big) - y_3 \Big(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_3^2 \Big)$	2.	Система дифференциальных уравнений	Структурная схема	Примечания
		Координаты $y_1$ , $y_3$ $\left[J_1\dot{y}_1+y_1\Big(k_1(l_1+l_2)^2+k_2l_2^2\Big)-y_3\Big(k_1(l_1+l_2)^2+k_2\frac{l_2l_4(l_1+l_2)}{l_3+l_4}\Big)=P\cdot(l_1+l_2)^2\right]$	$ \left\{ k_1(t_3 + l_4)^2 + k_2 \frac{l_2 t_4(t_3 + l_4)^2}{l_4 + l_2} \right\} $ $ \left\{ k_1(t_4 + l_4)^2 + k_2 \frac{l_2 t_4(t_3 + l_4)^2}{l_3 + l_4} \right\} $ $ \left\{ k_1(t_4 + l_4)^2 + k_2 \frac{l_2 t_4(t_4 + l_4)^2}{l_3 + l_4} \right\} $ $ \left\{ k_1(t_4 + l_4)^2 + k_2 \frac{l_2 t_4(t_4 + l_4)^2}{l_3 + l_4} \right\} $	$a_1 = k_1(l_1 + l_2)^2 + k_2 \frac{l_2 l_4(l_1 + l_2)}{l_3 + l_4}$ $a_2 = k_1(l_3 + l_4)^2 + k_2 \frac{l_2 l_4(l_3 + l_4)}{l_1 + l_2},$
Передаточные функции $ W_1 = \frac{y_1}{P} = \frac{\left(l_1 + l_2\right)^2}{P \cdot c - a_1 a_2} \; , \; W_2 = \frac{y_3}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot \left(l_1 + l_2\right)^2}{P \cdot c - a_1 a_2} \; . $ $ K_{pp} = \frac{k_1 k_2 \left(l_1 - l_2\right)^2}{k_1 + k_2 \left(l_1 + l_2\right)^2} \; . $ $ K_{pp} = \frac{k_1 k_2 \left(l_1 - l_2\right)^2}{k_1 + k_2 \left(l_1 + l_2\right)^2} \; . $ $ K_{pp} = \frac{k_1 k_2 \left(l_1 - l_2\right)^2}{k_1 + k_2 \left(l_1 + l_2\right)^2} \; . $ $ \left[ J_1 \ddot{y}_2 + y_2 \left(k_1 \left(l_1 + l_2\right)^2 + k_2 l_2^2\right) - y_4 \left(k_1 \left(l_1 + l_2\right) \left(l_2 + l_2\right) \left(l_1 + l_2\right) \left(l_1 + l_2\right) \left(l_2 + l_2\right$		$\left(J_2\ddot{y}_3 + y_3 \left(k_1 \left(l_3 + l_4\right)^2 + k_2 l_4^2\right) - y_1 \left(k_1 \left(l_3 + l_4\right)^2 + k_2 \frac{l_2 l_4 \left(l_3 + l_4\right)^2}{l_1 + l_2}\right) = 0$	7	$b = J_1 p^2 + k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2,$ $i_1 = \frac{l_2}{l_2 + l_2}, i_2 = \frac{l_4}{l_2 + l_2},$
$W_1 = \frac{y_1}{P} = \frac{(l_1 + l_2)^2}{P - c_1 a_2};  W_2 = \frac{y_3}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot (l_1 + l_2)^2}{b \cdot c - a_1 a_2}.$ $Koop matter Solution is y_2, y_4 \begin{cases} Koop matter Solution is y_2, y_4 = \frac{y_3}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot (l_1 + l_2)^2}{b \cdot c - a_1 a_2}. \begin{cases} J_1 \dot{y}_2 + y_2 \left(k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2\right) - y_4 \left(k_1 \frac{(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)l_4}{l_4} + k_2 l_4^2\right) = 0 \\ J_2 \dot{y}_4 + y_4 \left(k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_4^2\right) - y_2 \left(k_1 \frac{(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)l_4}{l_2} + k_2 l_4^2\right) = 0 \end{cases} \begin{cases} M_1 = \frac{y_2}{P} = \frac{k_1 k_2 (l_1 - l_2)^2}{l_2} \\ M_2 = \frac{l_2}{P} = \frac{l_2}{P} \\ D_2 \dot{y}_4 + y_4 \left(k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_4^2\right) - y_2 \left(k_1 \frac{(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)l_4}{l_2} + k_2 l_4^2\right) = 0 \end{cases} \begin{cases} M_1 = \frac{y_2}{P} = \frac{k_1 k_2 (l_1 - l_2)^2}{l_2} \\ M_2 = \frac{l_2}{P} = \frac{l_2}{P} \\ D_2 \dot{y}_4 + y_4 \left(k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_4^2\right) - y_2 \left(k_1 l_4 $		Передаточные функции	Значения приведенной жесткости	$c = J, p^2 + k. (l, +l.)^2 + k. l^2.$
Координаты $y_2$ , $y_4$		$W_1 = \frac{y_1}{P} = \frac{(l_1 + l_2)^2}{b \cdot c - a_1 a_2}$ ; $W_2 = \frac{y_3}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot (l_1 + l_2)^2}{b \cdot c - a_1 a_2}$ .	$K_{np} = \frac{k_1 k_2 \left(i_1 - i_2\right)^2}{k_1 + k_2 \left(i_1^2 + i_2^2\right)}.$	2.5.4 )
$\begin{cases} \frac{1}{k_1(l_1+l_2)^2+k_2l_2^2} \\ \frac{1}{k_1(l_3+l_4)^2+k_2l_4^2} \end{bmatrix} \frac{1}{k_1} \\ 3$ Значения приведенной жесткости $K_{np} = \frac{k_1k_2(i_1-i_2)^2}{k_1+k_2(i_2+i_2)^2}.$	<i>.</i> .	Координаты $y_2$ , $y_4$ $\left[J_1\ddot{y}_2 + y_2\left(k_1(l_1 + l_2)^2 + k_2l_2^2\right) - y_4\left(k_1\frac{(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)l_2}{l_4} + k_2l_2^2\right) = P \cdot l_2^2\right]$		$a_1 = k_1 \frac{(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)l_2}{l_4} + k_2 l_2^2$ $a_2 = k_1 \frac{(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)l_4}{l_4} + k_2 l_4^2$
и Значения приведенной жесткости $a_1 \cdot c \cdot l_2^2$ $b \cdot c - a_1 a_2$ . $K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1^2 + i_2^2)}.$		$\left[J_2\ddot{y}_4+y_4\Big(k_1\big(l_3+l_4\big)^2+k_2l_4^2\Big)-y_2\bigg(k_1\frac{\big(l_1+l_2\big)\big(l_3+l_4\big)l_4}{l_2}+k_2l_4^2\bigg)=0$	22	$b = J_1 p^2 + k_1 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2$ $l_2 = l_1 p^2 + k_2 (l_1 + l_2)^2 + k_2 l_2^2$
$\frac{a_1 \cdot c \cdot l_2^2}{b \cdot c - a_1 a_2}.$ $K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1^2 + i_2^2)}.$		Передаточные функции	Значения приведенной жесткости	$l_1 = \frac{1}{l_1 + l_2}, l_2 = \frac{1}{l_3 + l_4}$
		$W_1 = \frac{\mathcal{Y}_2}{P} = \frac{l_2^2}{b \cdot c - a_1 a_2}$ ; $W_2 = \frac{\mathcal{Y}_4}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot l_2^2}{b \cdot c - a_1 a_2}$ .	$K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1^2 + i_2^2)}.$	$c = J_2 p^2 + k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_4^2$







Значения приведенных жесткостей при параллельном соединении с «разнесением» для случая представленного на рис,4в

ž	Система дифференциальных уравнений	Структурная схема	Примечания
	Координаты $\varphi_1, \varphi_2$	a,	$a = a_1 = k_1 l_1 (l_3 + l_4) + k_2 l_2 l_4,$
	$\left[J_1\ddot{\varphi}_l + \varphi_l\left(k_1l_1^2 + k_2l_2^2\right) + \varphi_2\left(k_1l_1\left(l_3 + l_4\right) + k_2l_2l_4\right) = 0\right]$		$b_1 = J_1 p^2,$
	$\begin{cases} J_2 \ddot{\varphi}_2 + \varphi_2 (k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_4^2) + \varphi_1 (k_1 l_1 (l_3 + l_4) + k_2 l_2 l_4) = 0 \end{cases}$		$c_1 = J_2 p^2, b_2 = k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2,$ $c_2 = k_1 (l_2 + l_4)^2 + k_2 l_4^2,$
. –	Передаточные функции	Значения привеленной жесткости	$i = \frac{l^2}{l}, i = \frac{l_4}{l}$
	$W_1 = \frac{\varphi_1}{M} = \frac{b}{b \cdot c - a^2};  W_2 = \frac{\varphi_2}{M} = \frac{a}{b \cdot c - a^2}.$	$K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1^2 + i_2^2)}.$	$b = J_1 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2,$ $c = I_1 r^2 + l_1 l_1^2 + l_2 l_2^2,$
2.	Система дифференциальных уравнений	Структурная схема	Примечания
	Координаты $y_1, y_3$	$ \frac{k_1(l_3+l_4)^2+k_2\frac{l_2l_4(l_3+l_4)}{l_1}}{l_1} $	$a_1 = k_1 l_1^2 + k_2 \frac{l_1 l_2 l_4}{l_1 l_1},$
	$\left(J_1\ddot{y}_1 + y_1 \left(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2\right) - y_3 \left(k_1 l_1^2 + k_2 \frac{l_1^2 l_4}{l_3 + l_4}\right) = P \cdot l_1^2$	$\frac{1}{J_1 P^2} \qquad \frac{1}{k_1 l_1^2 + k_2} \frac{I_1 l_2 l_4}{I_3 + I_4} \qquad \frac{1}{J_2 P^2}$	$a_2 = k_1 \left( l_3 + l_4 \right)^2 + k_2 \frac{l_2 l_4 \left( l_3 + l_4 \right)}{l_3 l_4 \left( l_3 + l_4 \right)}$
	$\left\{J_2\ddot{y}_3 + y_3\left(k_1\left(l_3 + l_4\right)^2 + k_2l_4^2\right) - y_1\left(k_1\left(l_3 + l_4\right)^2 + k_2\frac{l_2l_4\left(l_3 + l_4\right)}{l_1}\right) = 0\right\}$	$\left\{ k_{11}^{2} + k_{2}I_{2}^{2} \right\}^{J_{1}} $ $\left\{ k_{1} \left( l_{3} + l_{4} \right)^{2} + k_{2}I_{2}^{2} \right\}^{J_{3}}$	$b = J_1 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 , i_1 = \frac{l_2}{l_1},$
	Передаточные функции	Значения приведенной жесткости	$c = J_2 p^2 + k_1 (l_3 + l_4)^2 + k_2 l_4^2,$
	$W_1 = \frac{y_1}{P} = \frac{l_1^2}{b \cdot c - a_1 a_2}$ ; $W_2 = \frac{y_3}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot l_1^2}{b \cdot c - a_1 a_2}$ .	$K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1^2 + i_2^2)}.$	$i_2 = \frac{l_4}{l_3 + l_4}.$
w.	Координаты $y_2$ , $y_4$	$ \int_{I_1} \frac{(I_3 + I_4)I_1^2 I_4 + K_2 I_4^2}{I_2} $	$a_1 = k_1 \frac{l_1 l_2 (l_3 + l_4)}{l_4} + k_2 l_2^2,$
	$\begin{cases} J_1 \ddot{y}_2 + y_4 \left( k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 \right) - y_4 \left( k_1 \frac{\sqrt{3}}{l_1} + k_2 l_2^2 \right) = P \cdot l_2^2 \\ l_4 \end{cases}$	$\frac{1}{J_1p^2} \bigvee_{k} k_1 \frac{(l_3 + l_4)(l_4)}{l_4} + k_2 l_2^2 - k_2 l_2^2$	$a_2 = k_1 \frac{l_1 l_4 (l_3 + l_4)}{l_1} + k_2 l_4^2,$
	$\left\{J_2\ddot{y}_4 + y_4 \left(k_1 \left(l_3 + l_4\right)^2 + k_2 l_4^2\right) - y_2 \left(k_1 \frac{\left(l_3 + l_4\right)^{1/4}}{l_2} + k_2 l_4^2\right) = 0\right\}$	$\left\{ k_{1}l_{2}^{2} + k_{2}l_{2}^{2} \right\}^{3/2} $	$b = J_1 p^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 , i_1 = \frac{l_2}{l_1},$
	Передаточные функции	Значения приведенной жесткости	$c = J, p^2 + k_1(l_1 + l_1)^2 + k_2 l_2^2,$
	$W_1 = \frac{y_2}{P} = \frac{l_2^2}{b \cdot c - a_1 a_2}; \ W_2 = \frac{y_4}{P} = \frac{a_1 \cdot c \cdot l_2^2}{b \cdot c - a_1 a_2}.$	$K_{np} = \frac{k_1 k_2 (i_1 - i_2)^2}{k_1 + k_2 (i_1^2 + i_2^2)}.$	$i_2 = \frac{l_4}{l_3 + l_4}$ .





Ta6<sub>\lambda</sub>.5.

Значения приведенных жесткостей при параллельном соединении с «разнесением» для случая представленного на рис.4г

Примечания	$a = \frac{1}{\cos \alpha_1}, b = \frac{1}{\cos \alpha_2}, j = \frac{b}{a}, i = \frac{l_2}{l_1},$ $A = Jp^2, B = k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2.$	сти		Примечания	$a = \frac{1}{\cos \alpha_1}, b = \frac{1}{\cos \alpha_2}, j = \frac{b}{a}, i = \frac{l_2}{l_1},$ $A_1 = Jp^2, B_1 = k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2.$	сти		$a = \frac{1}{\cos \alpha_1}, b = \frac{1}{\cos \alpha_2}, j = \frac{a}{b}, i = \frac{l_1}{l_2},$ $A_2 = Jp^2, B_2 = k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2.$	сти	
Структурная схема	B	Значения приведенной жесткости	$K_{np} = k_1 + k_2 j^2 i^2 .$	Структурная схема	A 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Значения приведенной жесткости	$K_{np} = k_1 + k_2 j^2 i^2 .$	$\frac{1}{A_2} \int_{Y_2}$	Значения приведенной жесткости	$K_{np} = k_1 j^2 i^2 + k_2  .$
Система дифференциальных уравнений	Координата $\varphi$ $J\ddot{\varphi} + \varphi \left(k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2\right) = 0.$	Передаточные функции	$W = \frac{\varphi}{M} = \frac{Jp^2}{Jp^2 + k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2}.$	Система дифференциальных уравнений	Координата $y_1$ $J \cdot \ddot{y}_1 + y_1 \left( k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2 \right) = P \cdot l_1^2.$	Передаточные функции	$W = \frac{y_1}{P} = \frac{\left(Jp^2\right) \cdot l_1^2}{Jp^2 + k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2}  .$	Координата $y_2$ $J\ddot{y}_2 + y_2 \left( k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2 \right) = P \cdot l_2^2$ .	Передаточные функции	$W = \frac{y_2}{P} = \frac{\left(Jp^2\right)_2^2}{Jp^2 + k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 l_2^2}.$
Ñ	<del>-</del>			2.	<u> </u>			3.		





Ta6A.6.

ž	Система дифференциальных уравнений	Структурная схема	Примечания
	Координаты у, ф	A <sub>1</sub>	$\frac{\alpha}{\alpha} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda}$
	$\left[M\ddot{y} + y(k_1a^2 + k_2b^2) - \varphi(k_1aa_1l_1 + k_2bb_1l_2) = 0\right]$		$\left  \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
	$\begin{cases} J\ddot{\omega} + \omega & (k a^2 l^2 + k b^2 l^2) - v(k a a l + k b b l_c) = 0 \end{cases}$	R $R$ $R$ $R$ $R$ $R$ $R$ $R$ $R$ $R$	$b_1 = \frac{1}{j}, i = \frac{l_2}{j}, j = \frac{b}{\rho}, j = \frac{b}{\rho},$
	(* * * * * * * * * * * * * * * * * * *		$\begin{vmatrix} \cos \alpha_4 & l_1 & a & a_1 \end{vmatrix}$
			$A = A_1 = k_1 a a_1 l_1 + k_2 b b_1 l_2, B_1 = M p^2,$
	Передаточные функции	Значения приведенной жесткости	$C_1 = Jp^2, B_2 = k_1a^2 + k_2b^2,$
	$W_i = \frac{y}{z} = \frac{1}{1 + \frac{y}{z}} : W_i = \frac{\varphi}{z} = \frac{C}{z}$ .	$_{K}$ = $k_{1}k_{2}(i\cdot\rho-j)^{2}$	$C_1 = k_1 a_1^2 l_1^2 + k_2 b_1^2 l_2^2,$
	$^{1}$ $^{D}$ $^{B}$ $^{C}$ $^{A^{2}}$ $^{2}$ $^{M}$ $^{B}$ $^{C}$ $^{A^{2}}$	$^{12} p = k_1 + k_2 i^2 \cdot j^2 \cdot \rho^2$ .	$B = Mp^2 + k_1a^2 + k_2b^2,$
			$C = Jp^2 + k_1 a_1^2 l_1^2 + k_2 b_1^2 l_2^2$ .

Табл.7. Значения приведенных жесткостей при параллельном соединении с «разнесением» для случая представленного на рис.4ж

авнений $bb_1 l_2) = 0$ $+ k_2 bb_1 l_2) = 0$ I	Структурная схема	$a = \frac{1}{1}, b = \frac{1}{1}, a_1 = \frac{1}{1},$		$\begin{array}{c c} \begin{array}{ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$A = A_1 = k_2 a a \cdot l_1 + k_2 b b_1 l_2 \cdot B_2 = M p^2$	Значения приведенной жесткости $C_1 = Jp^2, B_2 = k, a^2 + k, b^2,$		
ифференциа  Координать $k_{2}b^{2}$ ) — $\phi(k_{1}c_{2})$ $k_{2}b^{2}$ — $k_{2}b_{1}^{2}l_{2}^{2}$ ) —  вредаточные $\frac{1}{C-A^{2}}$ ; $W_{2}$	Система дифференциальных уравнений Структу	Координаты у, ф	~~×	<b></b>	$B_2$	Передаточные функции Значения прив	$W_i = \frac{y}{z} = \frac{1}{z}$ ; $W_i = \frac{\varphi}{z} = \frac{C}{z}$ . $K_i = \frac{k_i}{z}$	



Табл.8. Значения приведенных жесткостей при параллельном соединении с «разнесением» для случая представленного на рис.4e

Примечания	$a = \frac{1}{\cos \alpha_1}, b = \frac{1}{\cos \alpha_2}, j = \frac{b}{a},$ $i = \frac{l_2}{l_2},$	$\frac{t_1 + t_2}{4 - t_2} = \frac{t_2}{2} = \frac{t_2}{2} = \frac{t_2}{4} = t_$	$A = Jp$ , $B = k_1 a (k_1 + k_2) + k_2 v k_2$ .	Примечания	$a = \frac{1}{\cos \alpha_1}, b = \frac{1}{\cos \alpha_2}, j = \frac{b}{a},$ $i = \frac{l_2}{l+1}, A_1 = Jp^2,$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$D_1 - n_1 \alpha \ (l_1 + l_2) + n_2 O \ l_2$ .	$a = \frac{1}{\cos \alpha_1}, \ b = \frac{1}{\cos \alpha_2}, \ j = \frac{a}{b},$ $i = \frac{l_1}{l + l}, \ A_2 = Jp^2,$	$B = k a^2 l^2 + k b^2 (l+l)^{\frac{3}{2}}$	-2 -1-1 -1 -2 (1 - 2) ·
Структурная схема	$\frac{1}{A} \downarrow \emptyset$	Значения приведенной жесткости	$K_{np} = k_1 + k_2 j^2 i^2.$	Структурная схема	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \end{array} \\ \\ \\ \\ $	Значения приведенной жесткости	$K_{np} = k_1 + k_2 j^2 i^2.$	$\frac{1}{B_2}$	Значения приведенной жесткости	$K_{np} = k_1 j^2 i^2 + k_2 .$
Система дифференциальных уравнений	Координата $\phi$ $J\ddot{\phi} + \phi \left(k_1 a^2 \left(l_1 + l_2\right)^2 + k_2 b^2 l_2^2\right) = 0.$	Передаточные функции	$W = \frac{\phi}{M} = \frac{Jp^2}{Jp^2 + k_1 a^2 (l_1 + l_2)^2 + k_2 b^2 l_2^2}.$	Система дифференциальных уравнений	Координата $y_1$ $J\ddot{y}_1 + y_1 \left( k_1 a^2 \left( l_1 + l_2 \right)^2 + k_2 b^2 l_2^2 \right) = P \left( l_1 + l_2 \right)^2.$	Передаточные функции	$W = \frac{y_1}{P} = \frac{\left(Jp^2\right)(l_1 + l_2)^2}{Jp^2 + k_1a^2(l_1 + l_2)^2 + k_2b^2l_2^2}.$	Координата $y_2$ $J\dot{y}_1 + y_1 \left( k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 \left( l_1 + l_2 \right)^2 \right) = P \left( l_1 + l_2 \right)^2.$	Передаточные функции	$W = \frac{y_2}{P} = \frac{\left(Jp^2\right)\!\!\left(l_1 + l_2\right)^2}{Jp^2 + k_1 a^2 l_1^2 + k_2 b^2 \left(l_1 + l_2\right)^2} \ .$
Š	<u></u>		1	2.				3.		





Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Сузгаев М.В.

УДК 621.311

# ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗНОСА ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Содержание технических средств железнодорожного транспорта на высоком эксплуатационном уровне, обеспечивающем безопасность движения поездов и высокую эффективность процесса перевозок, невозможно без объективной информации об их фактическом состоянии. Объекты железнодорожного транспорта содержат большое количество устройств, длительная эксплуатация которых без надлежащего диагностирования технического состояния может привести к выходу их из строя и значительному материальному ущербу. Для реализации эффективного диагностирования этих устройств необходимы современные методики и технические средства контроля.

Одним из наиболее дорогостоящих и ответственных элементов системы электроснабжения являются силовые трансформаторы: тяговые (ТТ) и районные понизительные (РПТ). Многие из этих трансформаторов отработали нормативный ресурс. Процедуры оценки состояния изношенных трансформаторов находятся на стадии становления. В дистанциях электроснабжения филиалов ОАО «РЖД» имеется современная вычислительная техника, которая обеспечивает информационную поддержку функционирования железной дороги. В частности, внедрение автоматизированных систем учета электроэнергии позволяет в режиме реального времени получать информацию о получасовых расходах активной и реактивной электроэнергии на тягу поездов и по вводам распредустройств районных потребителей 6-10 кВ. Эта информация может быть использована для мониторинга состояния силовых трансформаторов. При мониторинге целесообразно контролировать следующие параметры:

- ullet кратность и длительность перегрузки;
  - степень несимметрии токов;

- температуры наиболее нагретой точ-ки масла и обмоток;
- степень старения витковой изоляции;
- состав газов, выделяющихся при неисправностях с помощью хромотографического анализа;
  - потери электрической энергии.

Структура системы мониторинга ТТ и РПТ представлена на рис. 1. В качестве исходной информации для определения степени старения витковой изоляции используются данные о получасовых расходах электроэнергии и показания датчиков температуры. Определение остаточного ресурса изоляции осуществляется по методике, изложенной в работе [1].

Общий износ изоляции обмоток состоит из динамического и теплового износов, взятых со своими весовыми коэффициентами. Определение этих коэффициентов представляет собой трудоемкую задачу, требующую большого статистического материала за продолжительное время. Такой материал может быть получен на основе систем мониторинга. По мере накопления статических массивов будет совершенствоваться и сама модель оценки состояния витковой изоляции.

В задаче контроля износа витковой изоляции трансформатора есть два существенных аспекта:

- исходные данные представлены в виде получасовых значений расхода активной и реактивной электроэнергии по трехфазным вводам;
- тяговая нагрузка характеризуется существенной несимметрией.

Первый аспект ввиду малой постоянной времени нагрева обмотки (порядка 6 мин) обусловливает необходимость перехода к эффективным получасовым значениям тока, а второй аспект требует пофазного учета нагрузок. Одному из возможных путей преодоления





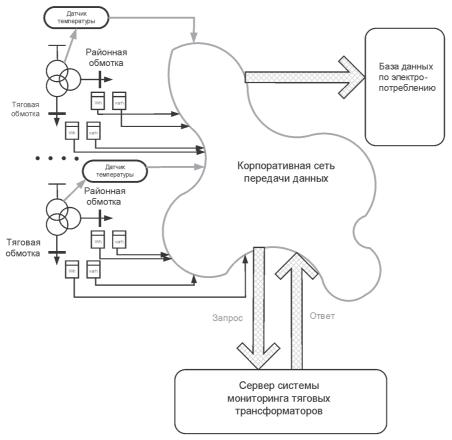


Рис. 1. Структура системы мониторинга тяговых трансформаторов.

этих трудностей и посвящена настоящая определяются графиками движения поездов и статья.

Ограничивая рассмотрение наиболее распространенными трехфазными трехобмоточными трансформаторами, можно определить связь эффективной (нагревающей) мощности сетевой обмотки со средними значениями мощностей тяговой и районной обмоток по формулам работы [2]:

$$P_{\mathcal{B}} = \sqrt{\left(P_{cpT} + P_{cpP}\right)^2 + \left[P_{cpT}^2 \left(k_{\phi AT}^2 - 1\right) + P_{cpP}^2 \left(k_{\phi AP}^2 - 1\right)\right]}$$
(1)

$$Q_{\ni_{B}} = \sqrt{\left(Q_{\tiny cpT} + Q_{\tiny cpP}\right)^{2} + \left[Q_{\tiny cpT}^{2}\left(k_{\phi PT}^{2} - 1\right) + Q_{\tiny cpP}^{2}\left(k_{\phi PP}^{2} - 1\right)\right]},$$
(2)

где  $P_{\mathfrak{I}_B}$ ,  $Q_{\mathfrak{I}_B}$  — эффективные активные и реактивные мощности сетевой обмотки,  $P_{cpT}$ ,  $P_{cpP}$ ,  $Q_{cpT}$ ,  $Q_{cpP}$  — средние активные и реактивные мощности соответственно тяговой и районной обмоток;  $k_{\phi AT}$ ,  $k_{\phi PT}$ ,  $k_{\phi AP}$ ,  $k_{\phi PP}$  — получасовые коэффициенты формы графиков активных и реактивных нагрузок соответственно тяговой и районной обмоток. Значения коэффициентов формы тяговой нагрузки

определяются графиками движения поездов и в рамках задачи моделирования износа изоляции считаются внешними данными. Получасовые коэффициенты формы районной нагрузки ввиду сравнительной ее стабильности целесообразно принять равными единице.

Формулы (1) и (2) необходимо применять для каждой фазы отдельно; значения напряжений разных фаз можно считать одинаковыми, а токи фаз тяговой обмотки можно получить по формулам, аналогичным приведенным в работе [1].

На рис. 2 показана схема трехфазного трансформатора без отображения районной обмотки, нагрузка которой предполагается симметричной. При отсчетах фаз относительно фазы АХ сетевой обмотки формулы для напряжений и токов фаз записываются следующим образом:

$$\begin{split} \dot{U}_{I} &= U_{T} e^{j0^{\circ}}; \dot{U}_{II} = U_{T} e^{-j60^{\circ}} = U_{T} (0.5 - j0.866); \\ \dot{U}_{ca} &= U_{T} e^{j180^{\circ}} = -U_{T}; \\ \dot{U}_{ab} &= U_{T} e^{j60^{\circ}} = U_{T} (0.5 + j0.866); \\ \dot{U}_{bc} &= U_{T} e^{-j60^{\circ}} = U_{T} (0.5 - j0.866); \end{split}$$





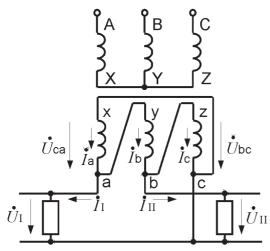


Рис. 2. Схема трехфазного трансформатора.

$$\begin{split} \dot{I}_{a} &= \frac{2}{3}\dot{I}_{I} + \frac{1}{3}\dot{I}_{II}; \dot{I}_{b} = -\frac{1}{3}\dot{I}_{I} + \frac{1}{3}\dot{I}_{II}; \dot{I}_{c} = -\frac{1}{3}\dot{I}_{I} - \frac{2}{3}\dot{I}_{II}; \\ \dot{I}_{I} &= I_{I}^{'} + jI_{I}^{''} = k_{I} \frac{P_{T} - jQ_{T}}{U_{T}}; \end{split}$$

$$\dot{I}_{II} = I_{II}^{'} + jI_{II}^{''} = k_{II} \frac{0.5P_{T} - 0.866Q_{T} - j(0.866P_{T} + 0.5Q_{T})}{U_{T}},$$

где  $S_T$ ,  $P_T$ ,  $Q_T$  — полная, активная и реактивная мощности по вводу 27.5 кВ,  $k_I$ ,  $k_{II}$  — коэффициенты распределения мощности ввода 27.5 кВ по плечам питания; остальные величины обозначены на рис. 2. Получить эти коэффициенты можно посредством использования программного комплекса имитационного моделирования систем тягового электроснабжения FAZONORD, разработанного в Иркутском государственном университете путей сообщения [3]. С помощью комплекса FAZONORD на основе данных о поездной работе следует выполнить имитацию работы рассматриваемого участка, что позволит определить искомые коэффициенты.

Токи фаз тяговой обмотки можно найти следующим образом:

$$I_{a}' = \frac{2k_{I}P_{T} + k_{II}(0.5P_{T} - 0.866Q_{T})}{3U_{T}};$$

$$I_{a}'' = \frac{-2k_{I}Q_{T} - k_{II}(0.866P_{T} + 0.5Q_{T})}{3U_{T}};$$

$$I_{b}'' = \frac{-k_{I}P_{T} + 0.5k_{II}P_{T} - 0.866k_{II}Q_{T}}{3U_{T}};$$

$$I_{b}'' = \frac{k_{I}Q_{T} - 0.866k_{II}P_{T} - 0.5k_{II}Q_{T}}{3U_{T}};$$

$$I_{c}' = \frac{-k_{I}P_{T} - k_{II}P_{T} + 1.732k_{II}Q_{T}}{3U_{T}};$$

$$I_{c}'' = \frac{k_{I}Q_{T} + 1.732k_{II}P_{T} + k_{II}Q_{T}}{3U_{T}};$$

а мощности фаз определятся равенствами следующего вида:

$$\dot{S}_{Ta} = \dot{S}_{Tac} = P_{Ta} + jQ_{Ta} =$$

$$= -U_{T}(I_{a}^{'} - jI_{a}^{''}) = -U_{T}I_{a}^{'} + jU_{T}I_{a}^{''};$$

$$\dot{S}_{Tb} = \dot{S}_{Tab} = U_{T}(0.5I_{b}^{'} + 0.866I_{b}^{''}) + jU_{T}(0.866I_{b}^{'} - 0.5I_{b}^{''});$$

$$\dot{S}_{Tc} = \dot{S}_{Tbc} = U_{T}(0.5I_{c}^{'} - 0.866I_{c}^{''}) + jU_{T}(-0.866I_{c}^{'} - 0.5I_{c}^{''}).$$

С учетом смены знаков при приведении генерации тяговой обмотки к нагрузке сетевой обмотки можно записать

$$P_{Ta} = \frac{1}{3} \left[ 2k_I P_T + k_{II} \left( 0.5 P_T - 0.866 Q_T \right) \right];$$

(3)

$$Q_{Ta} = \frac{1}{3} \left[ 2k_I Q_T + k_{II} \left( 0.866 P_T + 0.5 Q_T \right) \right]; \tag{4}$$

$$P_{Tb} = \frac{1}{3} \left[ k_I \left( 0.5 P_T - 0.866 Q_T \right) - k_{II} P_T \right]; \tag{5}$$

$$Q_{Tb} = \frac{1}{3} \left[ k_I \left( 0.866 P_T + 0.5 Q_T \right) + k_{II} Q_T \right]; \tag{6}$$

$$P_{Tc} = \frac{1}{3} \left[ k_I \left( 0.5 P_T + 0.866 Q_T \right) + 2 k_{II} P_T \right]; \tag{7}$$

$$Q_{Tc} = \frac{1}{2} \left[ k_I \left( -0.866 P_T + 0.5 Q_T \right) + 2 k_{II} Q_T \right]. \tag{8}$$

Загрузка фазы сетевой обмотки ввиду отсутствия токов нулевой последовательности определится нагрузкой тяговой фазы, третьей частью нагрузки района, потерями в фазах тяговой, районной и сетевой обмотках и третьей частью потерь холостого хода трансформатора:

$$\dot{S}_{Ba} = P_{Ba} + jQ_{Ba},$$

$$P_{Ba} = P_{Ta} + \frac{1}{3}P_{P} + \Delta P_{Ta} + \Delta P_{Pa} + \Delta P_{Ba} + \frac{1}{3}\Delta P_{x}; \qquad (9)$$

$$Q_{Ba} = Q_{Ta} + \frac{1}{3}Q_{P} + \Delta Q_{Ta} + \Delta Q_{Pa} + \Delta Q_{Ba} + \frac{1}{3}\Delta Q_{x}. \qquad (10)$$

При одинаковых номинальных мощностях обмоток активные сопротивления фаз обмоток, приведенные к стороне высокого напряжения, равны:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{3U_B^2 \Delta P_K}{2S_R^2},$$

где  $U_{\scriptscriptstyle B}$  — номинальное напряжение фазы ВН,  $S_{\scriptscriptstyle R}$  — номинальная мощность,  $\Delta P_{\scriptscriptstyle K}$  — потери короткого замыкания трансформатора.

Потери мощности в фазе тяговой обмотки можно вычислить так:





$$\Delta P_{Ta} = R_1 I_{Ta}^2 = \frac{3S_{Ta}^2 \Delta P_{\kappa}}{2S_{\omega}^2} = \frac{1}{6} \Delta P_{\kappa} k_{3Ta}^2, \quad (11)$$

где  $k_{_{3Ta}}=\frac{3S_{_{Ta}}}{S_{_{B}}}$  — коэффициент загрузки фазы

тяговой обмотки.

Аналогично определяются потери для фаз районной и сетевой обмоток трансформатора:

$$\Delta P_{pa} = \frac{1}{6} \Delta P_{\kappa} k_{_{3}P}^{2}; \qquad (12)$$

$$\Delta P_{\scriptscriptstyle Ba} = \frac{1}{6} \Delta P_{\scriptscriptstyle K} k_{\scriptscriptstyle 3Ba}^2 \,, \tag{13}$$

где  $k_{_{3P}}=\frac{S_{_{P}}}{S_{_{_{H}}}^{^{2}}}-\,$  коэффициент загрузки всей ра-

йонной обмотки (в предположении симметрии районной нагрузки),  $k_{{\scriptscriptstyle 3Ba}}=\frac{3S_{{\scriptscriptstyle Ba}}}{S_{{\scriptscriptstyle H}}}$  — коэффици-

ент загрузки фазы сетевой обмотки,  $S_{_{Ba}} = \sqrt{P_{_{Ba}}^2 + Q_{_{Ba}}^2}$  .

Выражения для потерь реактивной мощности из-за различия напряжений короткого замыкания выглядят несколько иначе. Реактивные сопротивления катушек, приведенные к напряжению сетевой обмотки, определяются напряжениями короткого замыкания [3]:

$$X_{_{B}} = \frac{3U_{_{B}}^{^{2}}}{200S_{_{R}}}(u_{_{B}T}\text{'}+u_{_{B}P}\text{'}-u_{_{T}P}\text{'});$$

$$X_{_{T}} = \frac{3U_{_{B}}^{^{2}}}{200S_{_{R}}}(u_{_{B}T}\text{'}-u_{_{B}P}\text{'}+u_{_{T}P}\text{'});$$

$$X_{_{P}} = \frac{3U_{_{B}}^{^{2}}}{200S_{_{R}}}(-u_{_{B}T}\text{'}+u_{_{B}P}\text{'}+u_{_{T}P}\text{'}),$$
где  $u_{_{ij}}\text{'}=\sqrt{u_{_{ij}}^{^{2}}-\left(\frac{100\Delta P_{_{K}}}{S_{_{R}}}\right)^{^{2}}}$  — напряжение корот-

кого замыкания, скорректированное на падение напряжения на активном сопротивлении,  $u_{ij}$  — напряжение короткого замыкания трансформатора в процентах.

Реактивные потери в фазах обмоток нахолятся так:

$$\Delta Q_{Ta} = X_{T} I_{Ta}^{2} = \frac{3S_{Ta}^{2}}{200S_{R}} (u_{BT}' - u_{BP}' + u_{TP}') =$$

$$= \frac{k_{3Ta}^{2} S_{R}}{600} (u_{BT}' - u_{BP}' + u_{TP}');$$

$$\Delta Q_{Pa} = X_{P} I_{Pa}^{2} = \frac{3S_{Pa}^{2}}{200S_{R}} (-u_{BT}' + u_{BP}' + u_{TP}') =$$

$$= \frac{k_{3P}^{2} S_{R}}{600} (-u_{BT}' + u_{BP}' + u_{TP}');$$
(15)

$$\Delta Q_{Ba} = X_{B} I_{Ba}^{2} = \frac{3S_{Ba}^{2}}{200S_{H}} (u_{BT}' + u_{BP}' - u_{TP}') =$$

$$= \frac{k_{Ba}^{2} S_{H}}{600} (u_{BT}' + u_{BP}' - u_{TP}').$$
(16)

Реактивная мощность холостого хода определяется током холостого хода  $i_x$   $\Delta Q_x = \sqrt{(i_x S_{_R} \slash 100)^2 - \Delta P_x^2}$  .

Алгоритм расчета эффективных токов фаз сетевой обмотки по получасовым значениям расхода активной и реактивной электроэнергии тяговой и районной обмоток выглядит следующим образом.

- 1. Получасовые значения расходов электроэнергии по вводам 27.5 кВ и по вводам районной обмотки хранятся в локальной базе данных по электропотреблению (ЛБДЭ), и по команде пользователя производится ее пополнение по всем трансформаторам дороги из базы данных АСКУЭ.
- 2. Расчеты износа и оставшегося срока службы производятся с использованием информации ЛБДЭ и далее хранятся в локальной базе данных программного комплекса. При запуске программы производится отображение рассчитанного износа в текстовой и графической формах.
- 3. По получасовым расходам определяются средние получасовые мощности ввода 27.5 кВ и по формулам (3)... (8) вычисляются мощности фаз тяговой обмотки.
- 4. По формулам (11), (12), (14), (15) рассчитываются составляющие потерь мощностей фаз тяговой и районной обмоток.
- 5. Формулы (1) и (2) ввиду добавок потерь в обмотках, потерь в стали и меди используются в следующей форме:

$$\begin{split} P_{\ni_{8i}} &= \sqrt{\left(P_{cpTi} + \Delta P_{Ti} + \frac{1}{3}(P_p + \Delta P_{pa})\right)^2 + \left[P_{cpTi}^2\left(ksub\phi AT^2 - 1\right)\right]} + \\ &+ \frac{1}{3}\Delta P_x; \end{split}$$

$$\begin{split} Q_{\ni_{Bi}} &= \sqrt{\left(Q_{cpTi} + \Delta Q_{Ti} + \frac{1}{3}(Q_p + \Delta Q_{Pa})\right)^2 + \left[Q_{cpTi}^2\left(k_{\phi AT}^2 - 1\right)\right]} + \\ &+ \frac{1}{3}\Delta Q_x, \end{split}$$

где индекс i обозначает фазу обмотки.

6. По полученным значениям мощностей фаз сетевой обмотки с помощью формул (13) и (16) определяются потери в меди в фазах сете-





вой обмотки и добавляются к мощностям фаз сетевой обмотки.

фаз сетевой обмотки по среднему значению системы учета электроэнергии, возможен нефазного напряжения определяются эффективные токи фаз сетевой обмотки:

$$I_{\beta_{Bi}} = \frac{\sqrt{P_{\beta_{Bi}}^2 + Q_{\beta_{Bi}}^2}}{U_{CDB}}.$$

8. По эффективным значениям токов производится расчет относительного износа изоляции за получасовой период работы трансформатора в соответствии со стандартной методикой [4].

Расчеты износа предполагается произво- 1. дить в двух вариантах:

- расчеты износа без учета ретроспективы по имеющимся данным получасовых расходов электроэнергии, без отображения оставшегося срока службы;
- расчеты с учетом предыдущей (до запуска АСКУЭ) работы трансформатора по 3. информации о грузообороте и продолжительности окон; предполагается использование регрессионных зависимостей, обновляемых по мере накопления информации АСКУЭ.

### Вывод

На основе данных об электропотребле-7. Из полученных значений мощностей нии, получаемых из автоматизированной прерывный мониторинг износа силовых трансформаторов. Представленная методика позволяет производить пофазный контроль износа по данным электропотребления на тягу поездов и расходам электроэнергии нетяговыми потребителями.

### **ВИБЛИОГРАФИЯ**

- Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1982. — 528 с.
- Шидловский, А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. – M.: Энергоатомиздат, 1992. — 224 c.
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. - 273 c. - ISBN 5-7430-0568-0.
- 4. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.



Министерство Образования и Науки Российской Федерации Министерство Транспорта Федеральное агентство железнодорожного транспорта

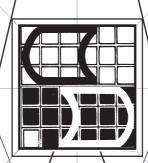


Иркутский государственный университет путей сообщения Российская инженерная академия

# Современные технологии

Систем/ный \анализ

Моде/лиров\ание



Раздел 3.

Экономические /инновации.

Социально/экономические исфледовфния.

# 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., Каштанов Ю.Б., Елисеев С.В.

УДК 001.4.658.382.3:006.354

# ОСНОВЫ СТРАТЕГИИ И ТАКТИКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫМ ЦЕНТРОМ МОНИТОРИНГА, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТРАНСПОРТНЫХ **CUCTEM**

ном технически сложными объектами, количеспостоянно растёт. Зачастую причиной их являются не отказы механизмов, систем управления или природные явления, а человек, то есть сра-Несмотря на достаточно высокую информационную и инструментальную вооруженность, человек не в состоянии сделать достоверный прогноз последствий принимаемых управленческих решений, оценить их риск. Причём эти проблемы возникают, как на оперативном уровне управления, так и на уровне управления при принятии стратегических решений.

Самым ярким примером подобного явления является, безусловно, Чернобыльская авария, но и в других сферах деятельности, когда неправильные преднамеренные или непреднамеренные действия человека вызывают аварии с тяжелыми последствиями для людей и значительным ущербом для отрасли, предостаточно. Особенно уязвимы в отношении дестабилизируюсвежи в памяти недавние аварии в авиации, когда ошибочные действия пилотов или наземных йство движения поезда не переходить в опасное диспетчеров унесли десятки и сотни человечес- состояние, ких жизней.

Непростая ситуация складывается и в железнодорожном транспорте. В настоящее вре- катор несоответствий и отказов определяет, мя наблюдается постоянный рост грузовых и что безопасность понимается, прежде всего, пассажирских перевозок, увеличение нагрузок на подвижной состав, железнодорожный ций, графика движения, их нарушение отнопуть, уменьшающийся ресурс для их ремонта, сится к дестабилизирующим факторам. При возрастающая психологическая нагрузка на расчете показателей безопасности в настоя-

Проблемы. В современном мире, насыщен- оперативно-диспетчерский персонал. Можно привести множество примеров, когда причиной тво нештатных ситуаций, аварий и катастроф аварии был человек, начиная от проезда машинистом красного сигнала светофора до грубых ошибок при ремонте пути или техники.

ОАО «РЖД» определяет безопасность пебатывает пресловутый «человеческий фактор». ревозок как одну из ключевых целей бизнеса, поэтому должно обеспечить минимальный уровень риска для пассажиров и грузов, окружающей среды и своих работников. Главный инженер Российских железных дорог В.А. Гапанович назвал вопрос обеспечения безопасности движения поездов и повышения эффективности перевозочного процесса главным стратегическим в деятельности компании [1].

Безопасность. Под безопасностью понимается отсутствие опасности. Само слово «безопасный» - означает неопасный, неугрожающий, не могущий причинить вреда или зла. Соответственно, безопасность перевозок - это свойство перевозок не создавать угрозы для здоровья и жизни пассажиров, персонала железных дорог, населения, груза, объектов внешней щих факторов, транспортные системы. У всех среды, для технических средств железных дорог. Безопасность движения поезда - это свокогда возникают поражающие факторы.

Существующий в ОАО «РЖД» классификак соблюдение технических норм, инструк-





щее время не принимаются во внимание угро- на железнодорожном транспорте должна лезы населению, не включается в состав общих показателей уровня безопасности и не измеряется соответствующим образом вред окружающей среде, угрозы здоровью и жизни пассажиров учитываются частично (не принимаются во внимание риски общественного поведения, которые в мировой практике включаются в данные о происшествиях на железной дороге и входят в статистику железных дорог).

Основной акцент при проведении анализа делается на технические причины и, частично, на человеческий фактор, в рамках которого рассматриваются крайне ограниченно риски персонала, при этом меры системного характера не применяются, а используется простая методика анализа - сопоставление количества нарушений в текущем периоде и предыдущем периоде, а также «симптоматическое лечение» проблемы. Совершенно очевидно, что этих мер недостаточно и фактически существующие методы повышения безопасности достигли уровня насыщения и не дают качественного роста [2].

В настоящий момент в ОАО «РЖД» модели риска и контроля не используются в качестве инструмента для управления и оценки уровня безопасности, и, в этой связи, от внимания менеджмента железной дороги и персонала ускользает важнейшая информация, необходимая для принятия адекватных управленческих решений.

Рассматривая общемировые тенденции в развитии систем управления безопасностью на железной дороге, можно заметить, что пришло понимание того факта, что нельзя обеспечить нулевой уровень безопасности (полное отсутствие каких-либо происшествий), но можно максимально к нему приблизиться. Таким образом, можно наиболее простым способом выявить прямую связь с управлением рисками — максимальный уровень безопасности на железной дороге соответствует уровню остаточного риска безопасности - то есть совокупного остаточного риска после реализации всех средств управления рисками [3].

Соответственно, повышение уровня управления безопасностью может быть реализовано посредством использования новых концепций, программ, методов и средств, в том числе, с применением современных инструментов и систем, с учетом эффективного использования имеющихся ресурсов. Именно поэтому в основе современных систем управления безопасностью

жать система управления рисками.

Риск. Определение понятия риск вытекает из определения безопасности. «Риск — это мера опасности». Риск в контексте управления безопасностью является риском безопасности в условиях оценки потенциального вреда пассажирам, персоналу, представителям общественности в результате операций и обслуживания железной дороги. Риск (совокупный риск) определятся как среднее количество несчастных случаев или эквивалентов несчастным случаям в год, которые могут произойти в системе железной дороги в течение длительного периода времени. Средний уровень риска в течение длительного периода времени рассматривает все выявленные события, как с высокой, так и с низкой вероятностью наступления [3].

Риск как физическая категория должен оцениваться через 2-мерное множество показателей: меру неопределенности появления негативного результата (степень риска) и меру последствий, или ущерба (цена, или величина, рис-Ka).

Мера неопределенности — это степень риска (больше, меньше или однозначное число - типа частоты (из статистики событий), вероятность (при априорных оценках) или экспертный показатель.

Источников неопределенности несколько, но, прежде всего - это неполнота, недостаточность наших знаний о системе управления, об объекте, окружающем мире. Нечёткие Компоненты, возникающие по причине концептуальной нечёткости. Данные компоненты могут быть связаны с неполным и недостоверным знанием об изучаемой системе. С подобного рода неопределенностью человек столкнулся очень давно, когда стал принимать осмысленные решения.

Другой источник неопределенности - это случайность, то, что в сходных условиях происходит неодинаково, что заранее нельзя предугадать. Спланировать каждый случай невозможно. Выход оборудования из строя и внезапное изменение конъюнктуры рынка, обострение политической ситуации - все это проявление случайности. К этому типу неопределенности отнести и противодействие. ОНЖОМ противодействие может проявляться в случае взаимодействия конкурирующих субъектов, при неопределенности спроса на услуги или продукцию, трудностях ее сбыта, либо прямые террористические действия.





различие между риском и неопределенностью. Неопределенность означает недостаток информации о возможных будущих событиях, риск же означает ситуацию, в которой люди, принимающие решение, точно не знают, что случится, но предполагают допустимость каждого из возможных исходов и могут дать им финансовую

Анализируя проблему измерения рисков в различных предметных сферах деятельности, можно сделать вывод, что "риск R — это случайное событие: опасное нежелательное и с последствиями в виде ущерба  $H_{\scriptscriptstyle R}$ ". Некоторое событие считается рискованным, если имеющимися техническими средствами нельзя обеспечить необходимую безопасность.

Из этого, например, следует, что определение "риск катастрофы или железнодорожной аварии" есть событие с последствиями, характерными для свойств рискового события. Здесь, таким образом, размытое определение меры опасности, вложенное в смысл слова "риск", уже четко преобразовано в строгое понятие события. Мера риска теперь должна определяться иначе в соответствующем пространстве исходов

Исходом каждой рисковой цепочки будет событие R с ущербом  $H_{R}$ , т.е. цена риска это  $H_{R}$ . Ущерб H<sub>в</sub> может быть выражен в стоимостном эквиваленте объекта или в виде материальных потерь (потери грузов, техники, прибыли).

Будем понимать риск, как завершающее случайное редкое (маловероятное) событие R в виде цепочки  $S_{\!\scriptscriptstyle R'}$  состоящей из случайных элементарных событий. Цепочки находятся по методу комбинаторики элементарных событий на дереве отказов.

Тогда риск, это математическое ожидание ущерба H от цепочки неблагоприятных событий  $i = \{1, n\}$ 

$$M(h) = \sum_{i=1}^{\nu} \eta_i p_i. \tag{1}$$

Риск включает в себя свойства случайных событий и отражает некоторые дополнительные свойства, зависящие от природы изучаемого случайного события: имеется мера опасности, т.е. доступно измерение риска с мерой опасности  $M_{\mathbb{R}}$ ; человеческий фактор выступает как элемент общей системной ошибки в цепочке событий; случайное событие типа риск несет ущерб или вред.

Система управления рисками. На железной дороге необходимо создавать новую для неё Система управления рисками должна обеспечи-

Вследствие этих причин можно указать систему управления безопасностью и рисками. Можно сказать, что основная парадигма безопасности предвидеть, предвосхитить опасность, суметь спрогнозировать нежелательные явления и дестабилизирующие факторы и не допустить, предотвратить их, уметь рассчитать риск принимаемых решений. Значит, надо уметь прогнозировать последствия принимаемых управленческих решений или последствия бездействия системы управления.

> В большинстве техногенных, природно-техногенных и социально-природно-техногенных катастроф начальные стадии формирования инициирующих процессов связаны с нахождением начальных повреждений в несущих конструкциях высоко-рисковых объектов [5]. Они создают цепочку развивающихся опасностей «повреждения  $\rightarrow$  отказы  $\rightarrow$  разрушение  $\rightarrow$  аварии  $\rightarrow$  катастрофы». Наибольшие ущербы и риски относятся к последним элементам этой цепочки, когда наблюдаются обрушения, крушения, пожары, взрывы, выбросы химически, биологически, радиационно опасных веществ. Эти стадии описываются уравнениями физики, химии, механики катастроф.

> Во многих отраслях, таких, как энергетика, военное дело, трубопроводный транспорт, связь, экономика и д.р. уже достаточно давно нашли применение методы управления, основанные на современных информационных технологиях. К ним, в первую очередь относятся: ситуационные центры, системы поддержки принятия решений, экспертные системы и др. На рис. 1 приведён пример реального ситуационного моделирования аварийных процессов в системе собственных нужд главных циркуляционных насосов для реакторов РБМК-1000 АЭС типа Чернобыльской станции [6,7,8,9]. В приведённом примере моделировалась и Чернобыльская авария за несколько лет до её реального события, но в то время на эти результаты просто не обратили внимания, т.к. не только расчёт рисков, но и анализ подобных нештатных ситуаций считался нецелесообразным.

> Основой для деятельности подобных систем на железной дороге должна быть база данных всех зафиксированных нештатных ситуаций, аварий, катастроф. База данных должна содержать предысторию возникновения аварийных ситуаций для исследования динамики аварийных процессов и причин их возникновения.





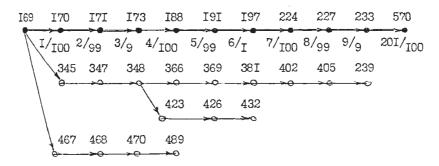


Рис. 1. Фрагмент причинно-следственной цепи ситуационной модели развития аварии в системе собственных нужд 5 КВ АЭС с реактором типа РБМК-1000:

169-570 – возможные состояния объекта; 169-исходный режим ITP+2IT+22T; I70 – короткое замыкание (к.з.) ITP; I7I – защита ITP сработала; I73 – BA отключился, BБ не отключился; I88 – к.з. 22Т; I9I – защита 22Т сработала; 197 – ВрА и ВрБ не отключались; 224 – к.з. 2ІТ; 227 – защита 2ІТ сработала; 233 – ВрА отключился, ВрБ не отключился; 570 – переход в режим с дизель-генератором. Т – главный трансформатор; ТР – рабочий трансформатор; ВА, ВБ, ВрА, ВрБ – группы выключателей; - входные возде-

вать глубокий секвенциональный анализ при- рисков, угрожающих управляемости корпорачин всевозможных нарушений и нештатных си- ции и др. Создание на железной дороге центуаций. Подобная структура базы данных обес- тров управления безопасностью и рисками печит возможность построения ситуационных должно стать основой для становления подомоделей, как для анализа событий, предшеству- бных систем управления на уровне региона ющих возникновению аварий, так и для поиска вследствие того, что железная дорога, особенуправления с целью предотвращения или лока- но в рамках транзитно-транспортных коридолизации аварий.

виде структуры независимой от руководства чества, работы которого зависит безопасность филиала дороги с тем, чтобы процесс выявления всей социально-экономической сферы региопричин аварийных ситуаций не был бы искажен корпоративными интересами. Другая стратегисостоит в персонофикации ответственности за выявленные нарушения и их устранение.

необходимо анализировать риски: макроэкономические, социально-экономические региональные, технологические и техногенные, экологические, риски потери информации, а также финансовые риски.

### Центр мониторинга, анализа и управления безопасностью.

Формирование стратегии и моделей поведения такой крупной корпорации, как железная дорога, или одного из её 17-ти филиалов, в условиях современных рынков требует привлечения средств и методов экономического моделирования, разработки средств мониторинга и прогнозирования результатов деятельности компании, использования огромных массивов корпоративных данных, отражающих различные стороны развития компании, регулярного анализа и оценки корпоративных ние модели процессов на железной дороге на

ров, таких как Транссиб, является системооб-Такая система должна быть реализована в разующим фактором, от безопасности и ка-

С целью отработки принципов создания ческая цель создания независимой структуры системы управления рисками в ИрГУПСе совместно с ВСЖД – филиалом ОАО «РЖД» создан Центр мониторинга, анализа и управле-Помимо оперативных задач управления ния безопасностью транспортных систем, который призван решать задачи мониторинга и анализа состояний ВСЖД – филиала ОАО «РЖД» и железнодорожных организаций в пределах дороги; выявления неблагоприятных изменений; поддержки принятия оперативных и неоперативных решений; оценки рисков и последствий, расчётов надёжности транспортных услуг; формирования оперативных и неоперативных докладов.

> Центр должен стать методической базой для выработки проектных решений по обеспечению: безопасности транспортных услуг, управлению рисками, процессно-ориентированному управлению, аналитических исследований, учебным полигоном для менеджеров железнодорожного транспорта завтрашнего

Среди актуальных задач Центра - созда-





Рис. 2. Основные научные направления университетского комплекса (ИрГУПС).

базе сбалансированных комплексных показателей, разработка сбалансированных комплексных показателей, которая позволит описать динамику изменений состояний объекта управления, как комплекса чётких и подлежащих оценке причинно-следственных отношений. Формирование модели компании на базе сбалансированной системы показателей обеспечит, помимо технической сферы, поиск возможностей достижения желаемых результатов - финансовых и клиентских целей. На модели будут анализироваться внутренние процессы: разработка услуг и продукции, развитие брэнда и рынка, продажи, логистика, которые необходимы для создания предложений потребительской ценности, специализации и финансовых результатов.

На рис. 2 представлены основные научные направления университетского комплекса.

Базовыми технологиями Центра призваны стать возможности сценарного моделирования и управления рисками в процессе принятия решений руководством дороги. Они ориентированы на обеспечение реализации долгосрочных программ развития. В первую очередь, и система сценарного моделирования, и система анализа рисков ориентированы на ключевые показатели, которые в укрупненном масштабе интегрированы в развитие отрасли. Это наиболее объемные факторы, которые определяют долгосрочную динамику стратегической программы и связанные с нею риски.

В качестве пилотной зоны для отработки технических решений выбрано одно из сложнейших инженерных сооружений на железной дороге страны — Северо-Муйский тоннель (СМТ). В Центре осуществлён доступ в

реальном времени к АСУ ТП СМТ к его базам и банкам данных, к программным комплексам, работающим в системе информационного обеспечения СМТ.

Наработанные в Центре принципы, методики и технологии управления безопасностью и рисками станут базой для успешного функционирования региональных центров.

Аналитические технологии должны трансформироваться в образовательные технологии для широкого круга управленцев в ре-

гионе, чья деятельность связана с принятием решений в сложных ситуациях, обусловленных ограниченным временем и тяжелыми последствиями.

## Этапы деятельности Центра.

Идентификация. На этом этапе осуществляется выбор контролируемых параметров, в пространстве которых будет осуществляться описание процессов управления, структура объекта управления, его динамика. Контролируемыми параметрами являются значения датчиков, показателей, сигналы СЦБ, статистические данные, управляющие воздействия и дестабилизирующие факторы, обуславливающие возникновение и развитие отказов, нештатных ситуаций, аварий и катастроф.

На этом же этапе формируется система ключевых индикаторов, обеспечивающих ранее обнаружение нежелательных процессов, требующих вмешательства человека для управления.

**Мониторинг.** Это этап измерения значений этих параметров, ключевых показателей которые были определены на предшествующем этапе.

При мониторинге значений параметров осуществляется постоянное наблюдение за поведением объекта управления с целью немедленного обнаружения нештатных ситуаций, чреватых возможной опасностью для объекта управления.

Основная задача мониторинга — обнаружение отказов на такой стадии, когда вмешательство оперативного персонала способно локализовать развитие аварийной ситуации, не дав возможности каскадного развития.





Анализ. Анализ состояния объекта управления. Это собственно ситуация, которая складывается из текущих и предшествующих значений контролируемых параметров объекта управления или процесса, совокупности действующих на объект управляющих воздействий и дестабилизирующих факторов. Состояния объекта, это некие обобщенные показатели, параметры, индикаторы, которые должны быть идентифицированы на этапе формализации объекта. На этапе анализа осуществляется диагностика состояния и восстанавливается последовательность смены состояний при развитии аварийных процессов.

Прогноз. Это основной этап при управлении рисками. На этапе прогноза осуществляется причинно-следственный анализ, рассчитываются риски отдельных событий и цепочек событий. На этом этапе происходит анализ основных бизнес-процессов на железной дороге, выбор управления этими процессами и путей достижения желаемых результатов управления. При необходимости на этом этапе осуществляется оптимизация процессов управления при заданных целевых функциях.

Инструментальные средства для функционирования центра.

Эвристические методы. Они основаны на использовании мнения специалистов в данной

области знаний и, как правило, применяются для прогнозирования процессов, затруднительных для математического описания.

Для этих целей специально разработан метод, именуемый **FMEA** (Potential Failure Mode and Effects Analysis) — анализ видов и последствий потенциальных отказов [10]. В настоящее время он является одной из стандартных технологий анализа качества изделий и процессов, поэтому в процессе его развития выработаны типовые формы представления результатов анализа и типовые правила его проведения.

FMEA—анализ - это эффективный инструмент повышения качества разрабатываемых технических объектов, направленный на предотвращение дефектов или снижение негативных последствий от них. Это достигается благодаря предвидению дефектов и (или) отказов и их анализу, проводимому на этапах проектирования конструкции и производственных процессов. Метод может быть также использован для доработки и улучшения конструкций и процессов, запущенных в производство.

На этапе доработки конструкции технического объекта перед утверждением конструкции или при улучшении имеющейся ко-

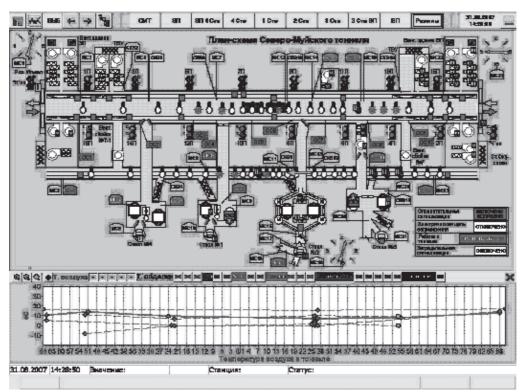


Рис. 3. Мнемосхема АСУ ТП Северо-Муйского тоннеля.





нструкции методом FMEA решают следующие залачи:

-определение "слабых" мест конструкции и принятие мер по их устранению;

предложенного и альтернативных вариантов конструкции;

-доработка конструкции до наиболее при- ва. емлемой с различных точек зрения: технологичности, удобства обслуживания, надежности и т.д.;

-сокращение дорогостоящих экспериментов.

На этапе доработки производственного процесса перед его запуском или при его улучшении методом FMEA решают следующие задачи:

-обнаружение "слабых" мест технологических процессов и принятие мер по их устранению при планировании производственных процессов;

-принятие решений о пригодности предложенных и альтернативных процессов и оборудования при разработке технологических процессов;

-доработка технологического процесса до наиболее приемлемого с различных точек зрения, а именно: надежности, безопасности для персонала,

-обнаружения потенциально дефектных технологических операций и т.д.;

-подготовка серийного производства.

На рис. 4 приведён пример построения ди- –получение сведений о риске отказов аграммы Исикавы [11] для одного из ключевых параметров на железной дороге - снижение коэффициента готовности подвижного соста-

> В настоящее время разработано достаточное число диалоговых программных систем и языков для формализации знаний предметных экспертов с целью построения феменологических моделей процессов в ЭВМ.

> Решение задач управления рисками с помощью логико-динамической модели [12,13, 14].

> Модель. Для эффективного решения задач управления рисками необходимо располагать динамической информационной моделью (моделями) объекта или процесса. В этой модели должны быть отражены знание экспертов о идентификации объектов управления, их свойствах, динамических характеристиках управляемости и реакции на различные нарушения и дестабилизирующие факторы. Эти модели могут носить, как феменологический характер, так и быть представлены с помощью системы уравнений. Способ формализации объектов и процессов будет определяться их свойствами, целями управления, динамичес-

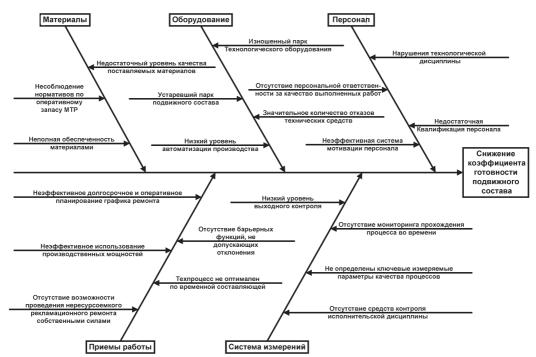


Рис. 4. Применение диаграммы Исикавы для идентификации объекта.





кими характеристиками и потребительской ельствах, при другом режиме не смогла бы чувствительностью решаемой задачи.

В самом общем виде сам объект управления D может быть представлен совокупностью всех правильных комбинаций его компонент - входов X и выходов Y.

$$D \subset X \times Y$$
. (2)

Входы объекта X, это все воздействия на объект, управляющие и дестабилизирующие, а выходы Y, это значения контролируемых параметров, значения ключевых показателей, которые были выявлены и выбраны на стадии идентификации.

Тогда моделью объекта будет преобразованиеF, связывающее входы X с выходами Y

$$F: X \to Y.$$
 (3)

Следовательно, задачей построения модели F является установление зависимостей  $X \to Y$ , т.е. причина — следствие.

Причинами X изменений ситуаций в процессе функционирования объекта являются различные воздействия внешнего  $X_d$ ,  $X_d \subset X$ и внутреннего  $X_o$ ,  $X_o \to X$ порядка, которые испытывает объект D. Внутренними  $X_{o}$  воздействиями могут быть отказы, обусловленные неисправностями оборудования, как, например, снижение давления или прекращение подачи топлива силовой установки тепловоза, повреждение СЦБ, неисправности пути или инженерных сооружений, короткие замыкания, ложная работа автоматики и пр.

Внешние воздействия  $X_d$  могут быть как преднамеренные, так и непреднамеренные. К и Y, т.е. условиями перехода p является состояпервым относятся все управляющие воздействия  $X_D \subset X_d$  на объект управления D с целью изменить его текущее состояние  $q^t \in Q$ , в том числе и ошибочные. Ко вторым  $X_s \subset X_d$ можно отнести различные природные явления, такие как геотектонические явления, грозы, снегопад, резкие изменения температуры, влекущие за собой падение деревьев на пути, провода, террористические акты и т.п.

В [6] показано, что для каждой системы D типа (3) существует множество глобальных состояний Q и функция глобальных реакций системы  $p:Q\times X\to Y$  такая, что

$$(x,y) \in D \Leftrightarrow (\exists q) [p(q,x) = y].$$
 (4)

Со свойством динамичности тесно связано основное свойство аварийных процессов причинная обусловленность. Одна авария как бы создает предпосылки, благоприятные условия для другой, которая в иных обстоятпроявиться.

Причинная обусловленность каждого последующего состояния  $q^{t+1} \in Q$  от текущего состояния  $q^t \in Q$  и текущего входного воздействия  $x^t \in X$  позволяет описать аварийные процессы в виде потока причинно-следственных связей из прошлого в будущее.

 $\Delta$ ля изучения поведения объекта D во времени введено понятие линейно-упорядоченного отношением ≤ множества моментов времени  $\tau$ . Для момента времени  $\tau = 0$  определено множество начальных состояний объекта  $q_{o}$ .

Для произвольного момента времени  $t \in \tau$ реакция  $p_t: Q_t \times X_t \to Y_t$  такова, что

$$(x_t, y_t) \in D \Leftrightarrow (\exists q_t) [p_t(q_t, x_t) = y_t]. \quad (5)$$

Множество всех реакций объединены в семейство реакций объекта

$$\overline{p} = \{ p_t : Q_t \times X_t \to Y_t, t \in \tau \}. \tag{6}$$

Для отражения динамических свойств объекта необходимо помимо  $\overline{p}$  задать семейство функций переходов

$$\overline{\varphi} = \{ \varphi_t : Q_{t-1} \times X_t \to Q_t ; t \in \tau \}. \tag{7}$$

Эти два семейства отображений (6), (7) полностью описывают переходы динамического объекта, поэтому пару  $(\bar{p}, \bar{\phi})$  можно назвать динамической моделью объекта. Для нахождения условий существования функций р и ф необходимо провести анализ динамики процессов, протекающих в объекте управления.

Если допустить пересечение алфавитов Xние Q процесса, отображаемые через его параметры и входы X как некоторые другие параметры, а результатом перехода, т.е. изменения состояния  $q^t$  на  $q^{t+1}$  являются новые значения параметров, то функционирование объекта можно описать в виде взаимодействия двух атрибутов — экстенсионала и интенсионала. Экстенсиональной частью данных модели объекта D будут параметры  $\left\{V_i \setminus i=1, \, \overline{n}\right\}$  и их значения  $\{ v_i^i / i = 1, \overline{n}; j = 1, \overline{m} \}$ , т.е. проекция векторов  $\dot{Y}$  на оси пространства  $R^V$  и условия для реализации входов X - тоже проекции векторов $\dot{X}$ . Интенсиональной частью модели объекта будут переходы из одного состояния в другое, т.е. правила преобразования векторов Y.

Итак, чтобы задать состояния Q объекта Sнеобходимо описать его экстенсиональную часть.

**Квантификация.** Состояния Q объекта D и его элементов  $d_i \in D_i$  соответствующие раз-





личным режимам работы при нормальном и аварийном функционировании, могут быть определены, наряду с метрическими контролируемыми параметрами, на множестве лингвистических переменны  $L = \{L_1, \ldots, L_n\}$ , в тех

случаях, когда параметрами идентификации объекта управления служат понятия, часто употребляемые человеком, такие как: «часто», «редко», «весьма вероятно», «в исключительных случаях», «много», «норма», «перегрев» и т.п. Лингвистические переменные L могут быть заданы как нечетких множества в пространстве параметров  $V = \left\{V_1, V_2, V_3, \ldots, V_n\right\}$ .

Соответствие вектора значений лингвистических переменных  $\dot{L}_j$  состояниям объекта устанавливается с помощью дедуктивной схемы вывода

$$\frac{\left\{L_1 \wedge L_2 \& \dots \& L_n\right\} \Rightarrow Q}{kQ},\tag{8}$$

которая означает, что если имеют место соответствующие значения переменных  $L_1, L_2, ..., L_n$ , то с уверенностью к имеет место состояниеQ.

Состояния Q являются структурными лингвистическими переменными, заданными с помощью других лингвистических переменных — параметров L, являющихся нечеткими подмножествами множеств значений физических параметров V с функцией принадлежности  $\mu_j(v_k^i)$ . Вследствие этого состояние q представимо нечетким подмножеством в декартовом произведении множеств  $V_1 \times V_2 \times ... \times V_n$ 

$$\forall q \in Q: q = \left\{ \mu_q \left( v_1, \dots, v_n \right) / \left( v_1, \dots, v_n \right) \right\}, \quad (9)$$

$$v_i \in V; i = 1, \overline{n}.$$

Степень принадлежности  $\mu_{q_k}(v)$  элементов этого множества к  $q_k$  определяется поверхностью  $\mu_q(v)$ , образованной пересечением в пространстве  $V^n \times \mu$  цилиндрических продолжений кривых, аппроксимирующих функции принадлежности  $\mu_{l^k}(v_k^i)$  значений параметров  $v_k^i$  к переменным  $l_i^k$ , входящим в формулу вывода  $q_k$ .

$$\mu_{q_k}(v_1,...,v_n) = \min(\mu_k(v_1),...,\mu_k(v_n)).$$
 (10)

Функции принадлежности  $\mu_k(v_i)$  определяют принадлежность значений параметров  $v_i$ , обусловленную ограничением, накладываемым

личным режимам работы при нормальном и на нее в результате проекции состояния  $q_k$  на аварийном функционировании, могут быть лингвистическую переменную  $l_i^k$ .

При решении задач диагностики состояния объекта  $q^t \in Q$  в процессе мониторинга будут определяться вектором значений контролируемых параметров  $\dot{v}^t$ .

Принятие решения по дифференциальной диагностике состояния объекта будет осуществляться после нахождения

$$q^t = \max(\mu_q(\dot{\mathbf{v}}^t)). \tag{11}$$

Функция принадлежности  $\mu_q(\dot{v}^t)$  будет характеризовать степень уверенности этого диагноза.

В простейших случаях лингвистические переменные, соответствующие значениям параметров, могут быть выражены в виде одноточечных множеств, или интервалов со значениями функции принадлежности {0,1}. Тогда процедура распознавания состояния вырождается в дешифратор состояния по значениям контролируемых параметров.

Следующий уровень обобщения представляют классы эквивалентных состояний. Классы могут включать в себя, например, множества штатных состояний нормального функционирования, начальных состояний (холодного резерва), предаварийных состояний или аварийных состояний различной тяжести и т.д. Как правило, класс состояний — это те данные, которыми осуществляется межуровневый обмен информацией.

Классы эквивалентных состояний, задаваемые отображением  $\Psi: Q \to \Omega$ , представляют собой объединение нечетких подмножеств и, следовательно, являются наименьшим нечетким подмножеством, содержащим эквивалентные состояния. Функция принадлежности к классу  $\omega$  представляет собой поверхность, образованную поверхностями функций принадлежности состояний.

$$\mu_{\omega}(\dot{v}) = \max(\mu_{q_1}(\dot{v}), \dots, \mu_{q_k}(\dot{v})).$$
 (12)

Описание состояний объекта и классов эквивалентности в качестве нечетких подмножеств множества значений параметров отражает неопределенность, обусловленную нечеткостью субъективной человеческой классификации. Функция принадлежности  $\mu_q(\dot{v}^t)$ , связанная с каждым распознанным состоянием при диагностике, отражает степень уверенности того, что зафиксированная ситуация как вектор выходных параметров  $\dot{v}^t$  соответствует





формализованной классификации состояний. ние единственно, то диагноз будет однознач-Но эта мера не учитывает стохастических свойств объекта и не отражает статистические знания, т.к. является субъективной шкалой для неточности.

Случайность. Так как риск в соответствии с (1) есть функция случайной величины, то для измерения неопределенности типа случайности служит вероятностная мера  $P = Q \rightarrow [0,1]$ . Но получение точных статистических оценок вероятности для различных состояний объектов и процессов достаточно непростая задача. Поэтому, наряду со статистическими данными, эксперты при работе используют свои субъективные характеристики, вероятности, сформировавшиеся в результате прошлого опыта и интуиции. При оценке вероятности соответствия значений параметров состояниям объекта эксперт соотносит субъективную вероятность не отдельным значениям шкалы  $V_i$  параметра  $V_{i,j}$  а значениям лингвистических переменных  $l_i$  терм-множества  $L_i$  , представленных в качестве нечеткого подмножества $V_i$ . Нечеткое подмножество  $q_{\scriptscriptstyle k}$  множества  $V_{\scriptscriptstyle i}$  играет роль нечеткого события. Вероятность этого нечеткого события (10) по параметру  $v_i^t$  является, если  $P_1$  ,  $P_2$  , . . . ,  $P_m$  - обычные вероятности, его математическим ожиданиям:

$$P(q_{k} / v_{i}) = E\mu_{q} = \mu_{I_{1}^{i}}(v_{i}^{t})P_{1} + ... + \mu_{I_{m}^{i}}(v_{i}^{t})P_{m};$$

$$P_{1} + P_{2} + ... + P_{m} = 1,$$
(13)

где E - оператор математического ожидания.

Функция принадлежности к состоянию  $q_k$ вектора параметров  $\dot{v}^t$  определяется с учетом (13) выражением

$$\mu_{q_k} \left( \dot{\mathbf{v}}^t \right) = \\ = \min \left( P(q_k / \mathbf{v}_1^t), P(q_k / \mathbf{v}_2^t), \dots, P(q_k / \mathbf{v}_m^t) \right), \quad (14)$$

где  $v_1^t,...,v_m^t$  - компоненты вектора  $\dot{v}^t$ .

Дифференциальная диагностика в этом случае состояния объекта заключается в нахождении

$$q^t = \max(\mu_{q_k}(\dot{v}^t)). \tag{15}$$

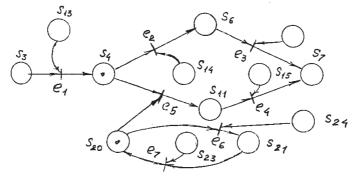
Итак, решение статистической задачи распознавания дает множество состояний  $\left\{q^{t}\right\}$ в каждый момент времениt, совместимых с зафиксированным вектором контролируемых параметров  $\dot{v}^t$ , с оценкой этой совместимости $\mu_{a^t}(\dot{v}^t)$ . В частном случае, когда состояным. В общем случае, при неоднозначном диагнозе совместимость  $\mu_{\sigma^t}(\dot{v}^t)$  является:

- 1. бинарной функцией {0,1}, если при распознавании использованы простые процедуры, либо модель описана на бинарных значениях параметров;
- 2. функцией принадлежности при описании состояний в модели с помощью нечетких множеств;
- 3. математическим ожиданием функции принадлежности, если состояние объекта  $q_i \in Q$  определены как нечеткое событие в пространстве параметров  $V^n$ .

Сети Петри. Сети Петри (СП) являются инструментом для моделирования и решения задач в области параллельных систем и асинхронных процессов, какими являются аварийные процессы в транспортной сфере. Сеть  $F = (S, E, \rho, \omega),$ Петри которой  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  - конечное множество позиций,  $n \ge 0$ ,  $E = \{e_1, e_2, ..., e_m\}$  - конечное множество переходов,  $m \ge 0$ ,  $S \cap \acute{E} = \varphi$ ,  $p: E \to S$  - является входной функцией - отображением из переходов в позиции,  $\alpha E \to S$  - выходная функция — отображение из переходов в позиции. Функционирование сети Петри формально описывается с помощью множества последовательностей срабатываний и множества достижимых в сети разметок. Разметки сети F это функция $M: S \to N$ . Если позиции сети упорядочены $S = (S_1, ..., S_n)$ , то разметки сети, в том числе и начальные, задаются как вектор чисел  $M = (m_1, ..., m_n)$  такой, что  $\forall i \mid 1 \le i \le n, m_i = M(S_i)$ . Отождествление переходов с выполнением информационных, организационно-технических или технологических процессов в объекте (14) делает представимыми указанные процессы в классе сетей Петри со свободным выбором или свободных сетей (ССП) и включающих в себя класс автоматных сетей. ССП  $F = (S, E, \rho, \omega)$  $\forall e_i \in E, p_i \in f(e_i): p(e_i) = \{S_i\} \lor \omega(S_i) = \{e_i\}, \text{ r.e.}$ любая дуга, ведущая от позиции к переходу, или начинается позицией, из которой не выходит ни одной другой дуги, или заканчивается переходом, в который не ведет никакая другая дуга. Интерпретацией метки в позиции будет выполнение условия срабатывания перехода, моделирующего реальные события. Позиции S ставятся в соответствие состояниям Q объекта, а переходы E сети F - переходам объекта из состояния в состояние. Срабатывание перехо-







 $S_3$ — горячий резерв,  $S_4$ — работа под нагрузкой,  $S_6$ — аварийний режим нагруженный,  $S_7$ — аварийный режим ненагруженный,  $S_{11}$ — предаварийный  $S_1$ ,  $S_{13}$ — включение нагрузки,  $S_{14}$ — неисправность силовой установки,  $S_{15}$ — аварийное отключение нагрузки,  $S_{20}$ — неисправность в нагрузке,  $S_{21}$ — нагрузка в норме,  $S_{23}$ — утечка в кабеле,  $S_{24}$ — замена кабеля.

Рис. 5. Пример моделирования работы военной автономной энергосистемы с помощью сети Петри.

дов будет моделировать динамику ситуационных процессов в объекте. В этом случае позиция $S_i^t$ , соответствующая некоторой текущей ситуации  $q^t$  должна иметь метку  $m^t(S_i)>0$ , а перемещение метки соответствует изменению ситуации. Для примера (рис. 5) можно привести результаты, выполненной ранее работы моделирования процессов функционирования автономной энергетической системы для задач энергообеспечения армии, фронта [15,16].

При моделировании информационных процессов в объектах с помощью аппарата СП проблемой является такая организация процесса выполнения сети, при которой не могут возникнуть конфликтные ситуации, не соответствующие реальным в объекте, не должны терять активности отдельные переходы и сеть должна сохранять свойство безопасности.

Проблемой является такое построение сети, при котором множество локальных ситуаций, моделирующих компоненту объекта, сохраняли бы свою автономность, обеспечивающую срабатывание переходов этой локальной подсети в соответствие с ее внутренними свойствами и в то же время сохранились бы точно определенные взаимодействия с другими компонентами модели. На языке СП это означает, что позиции других локальных моделей не должны терять метки при срабатывании переходов в других локальных моделях, в которых первые входят в качестве условия.

Раскрашенные условно-вероятностные Сети Петри со свободным выбором. Выразительных способностей сетей Петри со свободным выбором недостаточны для раскрытия неопределенностей, возникающих при диагностике и управления рисками. Определение дополнительных требований к сетям можно сделать из рассмотрения задачи диагностики на СП, которую можно сформулировать следующим образом. По значениям контролируемых параметров (ключевых индикаторов) V в каждый момент времени  $\tau = 0$ , t необходимо распознать ситуацию q или локальные ситуации  $u_i \subseteq q_i$  соответствующие данному набору значений параметров  $\dot{v}^t$  . Затем пометить позиции  $S_i = q_i$ , соответствующие распознанным ситуациям. Полученная разметка  $M^t$  укажет код глобального состояния объекта. В следующий момент t+1 новому вектору контролируемых параметров  $\dot{v}^{t+1}$  следует поставить в соответствие новую разметку $M^{t+1}$ . После этого необходимо выяснить достижимость разметки  $M^{t+1}$  из разметки  $M^t$ . Если путь  $R(M^t, F)$  нее-

динственен, то требуется выбрать наиболее короткий по соответствующему критерию.

Для уменьшения неопределенностей, возникающих при распознавании состояний, динамическая модель должна отображать нечеткости человеческой классификации ситуаций, размытость квантификаторов значений параметров, о которых сказано выше. Для этого необходима дополнительная интерпретация истинности метки  $m(S_i)$  в позиции  $S_i$ . Вместе с





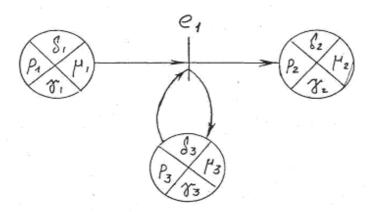


Рис. 6. Фрагмент раскрашенной СП.

дствие функционирования объекта, так и степень уверенности в том, насколько распознанная ситуация, по принятой при синтезе модели классификации, соответствует текущему вектору выхода контролируемых параметров  $\dot{v}^{t}$ . Вероятность функционирования и истинность принадлежности являются независимыми факторами - один обусловлен недетерминированностью объекта, другой - нечеткостью классификации его состояний, поэтому их следует представлять различными атрибутами сети.

Пользуясь терминологией раскрашенных сетей, можно сказать, что метка имеет как минимум два цвета. Один цвет отображает вероятность позиции, обусловленную функционированием сети, другой - степень уверенности в том, что данная позиция  $S_i$  активна, а соответствующее ее состояние  $q_i = S_i$  - истинно. Свертка этих двух факторов должна производиться на этапе принятия решения — во время диагностики и выбора управления.

И, теперь самое главное, метка должны нести информацию об ущербе для каждого локального события, иначе вычисление риска, через его матожидание будет, невозможным.

Определим свободную условно-вероятностную сеть с нечеткой маркировкой. Это сеть, имеющая четырехцветную маркировку  $(\rho,\mu,\delta,\gamma)$ :  $F = (S,E,\rho,\pi,\omega,p,\mu,\delta,\gamma)$ . В сети F множество S и  $\dot{E}$  - это прежние множества позиций и переходов,  $\rho: E \to S$  - входная функция,  $\pi{:}S_u \times E \to E \times S_u$  - функция условия перехода,  $\omega E \times S \to \lceil 0, 1 \rceil$  - вероятностная функция выхода,  $p:S \to \lceil 0,1 \rceil$  - функция вероятностной маркиров-

тем интерпретация метки должна отражать ки,  $\mu: S \to |01|$  - функция нечеткой маркировки, как вероятность той или иной ситуации всле-  $\delta: S \to E$  - функция входа позиции,  $\gamma$  - весовая функция ущерба (рис. 6),  $S_u \in S$  - позиции условия переходов.

> Срабатывание перехода  $e_i$  изменяет разметку P в сети F так, что разметка его входной позиции  $S_i = p(e_i)$  становится равной 0, разметка условной позиции  $S_u = \pi(e_i)$  не изменяется, а разметка выходной позиции (позиций) в соответствие с правилом становится равной:

$$P(S_k) = = P(P(e_i)) \cdot P(\pi(e_i)) \cdot P(\omega(e_i, S_k)).$$
(19)

Здесь  $P(\rho(e_i)) = P(S_j)$  - вероятность предшествующей позиции  $S_j$  ,  $P(\pi(e_i)) = P(S_u)$  - вероятность того, что имела место причина  $S_n$ , вызвавшая срабатывание перехода,  $P(\omega(e_i,S_k))$  - вероятность перехода в  $S_k$  из  $S_i$  в результате воздействия (причины)  $S_u$  .  $P(S_k)$  отражает совокупность этих трех независимых событий.

Если в выходную функцию  $\omega(e_i)$  включены также и входная позиция  $p(e_i) = S_i$  и  $\omega(e_i, S_i) > 0$ , то в результате срабатывания перехода  $e_i$  разметка входной позиции станет равной новому значению в соответствие с (10). Разметка  $\mu(S_i)$ вносится в позиции  $S_i$  процедурой раскрашивания и при функционировании сети не меняется. Разметка у представляет собой математическое ожидание функции принадлежности выходной позиции  $S_k = \omega(e_i)$ , зависящее от функций принадлежности входной позиции  $S_i = p(e_i)$ и условия  $S_u = \pi(e_i)$ , а также от вероятности  $\omega(e_i, S_k)$  перехода  $e_i$ :

$$\forall S_k = \omega(e_i): \gamma(S_k) = \\ = \min(\mu(S_i), \mu(S_u)) \cdot \omega(e_i, S_k).$$
 (20)





Процесс срабатывания перехода заверизаменения набора угроз и возможностей, осощается выбором минимального значения бое значение для ОАО «РЖД» приобретает функции принадлежности в соответствие с способность предотвращать возможные проправилами преобразования при пересечении блемы и убытки, максимально снижая вознечетких множеств и умножением его на вероможность этого события. Затем в разметку  $\delta$  заносится адрес входа  $e_i$  позиции  $S_k$ , который нес железнодорожных перевозок. Безусловобеспечил разметку  $\gamma(S_k)$ .

Начальная разметка  $p^0(S_k)$  осуществляется процедурой размечивания, которая в позиции S вносит числа из интервала [0,1], соответствующие вероятностям состояний Q. Если  $p(S_j)>0$ , то позиция является активной, а соответствующее ей состояние возможным с вероятностью  $p(S_j)$ . При срабатывании переходов E разметка позиций (вероятность состояний) меняется. Срабатывание перехода моделирует изменение состояния  $q^t = S_j$  объекта на  $q^{t+1} = S_k$ , в результате причиных  $q^t = S_k$ , которой являются дестабилизирующий фактор или управление.

Переход  $e_i$  является стохастическим событием вследствие того, что причина перехода  $x^{t} = S_{n}$  - это, с одной стороны, случайное явление (отказы, поломки оборудования, автоматики ЭЭО), с другой стороны - в результате одного и того же воздействия объект может переходить В различные состояния  $\{q_k^{t+1} = S_k / k > 1\}$ . Данная неопределенность обусловлена также недостаточной изученностью объекта, которую можно интерпретировать случайностью. Сеть F сохраняет свойство активности свободной сети, т.к. множества S и Е образуют совокупность тупиков с размеченными ловушками, свойственными свободной сети. Сеть F сохраняет также свойство безопасности активной свободной сети, т.к. при ее синтезе должен сохраняться принцип покрытия ее совокупностью связных автоматных подсетей. Каждая автоматная подсеть образована моделью процесса функционирования элемента объекта.

Анализ достижимости маркировки  $\left(p^{t+1}, \mu^{t+1}\right)$  из маркировки  $\left(p^{t}, \mu^{t}\right)$  является основной задачей этапов диагностики и управления. Решение задачи анализа достижимости 3. и будет решением искомых цепочек последовательности ситуаций рисков, которые были поставлены в начале статьи.

**Заключение.** В условиях постоянно меняющейся деловой среды, а также непрерывного

бое значение для ОАО «РЖД» приобретает способность предотвращать возможные проблемы и убытки, максимально снижая возможность ликвидации последствий негативных событий, оказывающих влияние на бизнес железнодорожных перевозок. Безусловно, это вызвано, в том числе, и тем, что железнодорожный транспорт является не только источником повышенной опасности, но и сам подвержен воздействию как внутренних, так и внешних рисков, имеющих различную природу. Эффективным инструментом для предотвращения возможных неблагоприятных последствий является система управления рисками, важность построения которой обуславливается также фундаментальными преобразованиями экономических отношений в сфере естественных монополий, необходимостью интеграции в Евроазиатскую транспортную систему, сменой собственников и базовых концепций деятельности железнодорожного транспорта, серьезных структурных изменений в системе менеджмента, созданием новых моделей управления бизнесом.

Поэтому, одним из приоритетных направлений при реформировании системы менеджмента ОАО «РЖД», должно стать становление системы управления рисками, в состав которой входит система мониторинга и обеспечения безопасности. Впоследствии эти системы должны охватывать все бизнес-процессы на дороге.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- Материалы Седьмой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». Москва. 26 – 27 октября 2006г. Евразия Вести II 2007. - 216 с.
- 2. Розенберг Е. Н. Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов/ Е. Н. Розенберг, В. И. Талалаев // Автоматика, связь, информатика: Научно-популярный производственно-технический журнал/ МПС России. -М. 2006. -N2. С. 10-12.
- 3. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г. Москва. 2003. 43 с.
- 4. Гражданкин А.И. Опасность и безопасность//Бе зопасность труда в промышленности 2002.-№9.-С.41-43.





- 5. Гапанович В.А., РАН Махутов Н.А. Реше- 11. Гапанович В.А. Повышение эффективносние проблем конструкционной прочности и техногенной безопасности на железнодорожном транспорте. (Наст сборник)
- 6. Каштанов Ю.Б., Горский Ю.М., Перминова Э.В., Проферансов Ю.Д., АдриановЕ.Н., Гольцман Э.М. Исследование возможности построения автомата-советчика для задач многоуровнего распознавания аварийных процессов на АЭС //В сб. "Методические вопросы надёжности". №14, Иркутск, 1977. C.21-25
- 7. Каштанов Ю.Б., Горский Ю.М., Перминова Э.В., Проферансов Ю.Д., Адрианов Е.Н., Гольцман Э.М. Некоторые возможности использования высших уровней иерархии АСУ ТП для предотвращения развития цепочечных аварий в электроэнергетических системах //Труды "Всесоюзный симпозиум по актуальным вопросам управления в больших системах энергетики" Иркутск, 1978. C. 76-83.
- 8. Каштанов Ю.Б., Горский Ю.М. и др. Результаты моделирования на ЭВМ развивающихся аварий и работы "интеллектуальной" системы, ориентированной на повы- 15. Каштанов Ю.Б. Возможности создания шение живучести АЭС //В сб. "Методические вопросы надежности больших систем энергетики" Иркутск, 1980г. С.32-35.
- 9. Каштанов Ю.Б., Горский Ю.М. Гольцман Э.М. Методические вопросы анализа осведомляющей информации и построения программно-вычислительного комплекса для имитации аварийных режимов мощных энергоблоков // Труды симпозиума, «Системы энергетики - тенденции развития и методы управления». Иркутск, 1981. C.115-121.
- 10. Potential Failure ode and Effects Analysis (FMEA). Reference manual. Second Edition. February. 1995. Ford Motor Company. 469 p.

- ти производственной деятельности ОАО «РЖД» на основе внедрения инструментов и подходов управления в технологические процессы промышленно-производственных и ремонтных предприятий ОАО «РЖД».// Функциональный проект улучшения качества. "Центр "Приоритет" Н.-Новгород. 2007 г. - 112 с.
- 12. YU. B. Kashtanov, A.M. Berlin, I.A. Sher. Methods and means use of artificial intelligence in power system investigations //Harwood Academic Publishers GmbH. Printed in the USA. 1993. pp. 1-29.
- 13. Каштанов Ю.Б. Экспертная система диагностики и подавления развивающихся аварийных процессов в технически-сложных системах. Деп. ВИНИТИ 09.02.1987, № 944-в 87. - 187 с.
- 14. Каштанов Ю.Б., Перминова Э.В. Головщикова И.А. Решение задач управления с помощью логических моделей экспертных систем //В сб. «Труды XI Совещания по технической диагностике. Ташкент, 1989г. C.17-22.
- "интеллектуального" советчика петчера для пунктов управления АвЭС сб. «Управление в автономных электроэнергетических системах с использованием микроэлектроники и системного анализа». Иркутск, 1980. С. 14-17.
- 16. Каштанов Ю.Б., Желнов А.И. Советчик оператора систем электроснабжения для диагностики и управления на базе методов дискретного моделирования и средств микроэлектроники //B сб. «ХҮ Военная наконференция» Киев, учно-техническая 1984 г. - С.35-39.





Solskaya I.Y.

УДК 330.34/35,47

# STRUCTURAL REFORM OF TRANSPORT AND FUNDAMENTAL RESEARCH IN **ECONOMICS**

The development of the sphere of transport management purposes services in Russia was carried out simultaneously growth of profit, capital and actives etc.) by market relations in economy. Thus development satisfaction. of the basic source of such services — the railway transport – went on non-uniformly: for last 15 mentally-applied research of the faculty became years the basic volumetric parameters, the level of investments, efficiency of branch have decreased. The structural reform, called to solve practical problems of branch, has led to formation of Open Society "PЖΔ" - society with the absolute state management system consists in the following: property of the assets, which has the aim to carry out economic activities in sphere of cargo and has passenger transportations. Thus the questions of the control and managing remain in state conducting at a level of the Ministry of transport. The process of bringing the branch into non-state property has been accomplished earlier in other transport complexes of Russia. Therefore prospects of transport system development in many respects are defined by abilities of transport agencies to overcome the existing difficulties.

It is remarkable, that during a long period of time there exists the tendency of the further concentration and centralization of the capital, development of a filial network of Open Society "РЖД" and occurrence of new forms of this process in the aggregate with significant expansion of the economic [13,14,15].

Existence of the developed filial network is connected the display of inner-organization interactions in two aspects: vertical - as way of realization hierarchical co-ordination (head office - branch - department functional division), and horizontal, allowing to communications take place in the organization. carry out equal-in-rights interactions of elements Coordinating influences are formed under on one or some levels of hierarchy.

In conditions of dynamical change of the mutual communications. environment, complexity increase structure organizational management expansion of the sphere of market mutual without problem consists in achievement of the

(stable and within the limits of the development of achieving a rather high level of the local purposes

> The theoretical base funda-"The Concept of the Home Market", which is a basis of the dissertation on competition of a scientific degree of Doctor of Economics [1].

The offered model of formation of corporate

- 1. In the structure of the organization, which complex distributed organizational structure of management, it is possible to allocate operating body and the object of management that have some levels of hierarchy. The environment influences different levels of the organization, and external influences on operating body and on separate divisions of a managing object can be various.
- 2. There take place: the purpose of the organization - the purpose of operating body, which is formed under influence of external influences and under the condition of object of management; the local purposes - the purposes of separate elements at different levels of hierarchy of management objects, which are formed under influence of external and internal influences on these elements.
- 3. The part of decision-making authorities in the external clients' services is delegated by operating body to the object of management according to the purposes of the organization.
- 4. Coordinating influences and mutual influence of the purposes of the organization and
- 5. There is an interaction between elements and of management object, which is carried out intermediary of top relations among divisions of the organization the Decision-making in the process of external





interaction.

between elements there are internal manufacturers/producers of services. Internal clients and manufacturers of services clients and internal are present at each level of hierarchy at the home market.

The nowadays existing theory management does not allow to solve a problem of formation of the coordinating influences in business and adequating market changes in economy as this theory does not consider properly peculiarity functioning of organizational structure elements in the conditions of a home market [2,3,6]. It is influenced on the one hand, by the presence of internal clients in the organization and services given by it, and on the other hand by the way of satisfaction of internal clients needs.

The author's definition of a home market is formulated according to the previous statements. This definition, first, corresponds to the essence of the internal market business infrastructure, and secondly, assumes the presence of out-of-market forms of coordination of subsystems (elements) relations of the organization. That is connected with the placement of internal contracts within the limits of existing technologies of servicing and it is caused by the business necessity of preservation of a parity between transaction costs and the supervision cots. The home market of the organization assumes such interaction of sellers and customers inside of the organization for which are characteristic: presence of entrance barriers, market and out-of-market mechanisms of coordination, and also steady internal communications between parts of the whole organization as a complete system, that is: competitive relations of internal producers sellers of resources and services with each other; relations of internal clients - buyers of resources and services with each other; relations of sellers with customers; relations of sellers with potential customers and potential competitors.

It is supposed, that the model of a control system should include the administrative scheme of the interaction in the system "operating body management" for successful organization functioning, as well as the market mechanisms of interaction within the limits of elements of one or several horizontal levels in hierarchical organizational structure. Thus coordinating influences of higher levels should consider the presence of home marketing

clients' service depends on results of such procedures at the bottom levels. Such model occupies an interposition between traditional 6. In the process of the direct interaction management methods (defined as exclusively administrative) and essentially marketing methods, formed under influence of a free competition.

The interaction of elements at various levels organizational management structure and form of hierarchy of management object is formed within the limits of a home market, under supply-and-demand influence, as well as under influence of a foreign market, that is under demand from external clients.

> The most important point in the model is the presence of coordinating influences which necessity is caused as by the general laws of control systems development - by necessity of preservation of system under conditions of a dynamical external environment — as well as by specificity of the activity with significant risks. Besides the behavior co-ordination of the system parts reflects the awareness of contradictions between the global and the local purposes. The coordination is associated in the theory of the organization, first of all, with determination of the independence degree of the organization elements.

> It is supposed, that the main task of coordination consists in the achievement coordination in the work of all parts of the organization by the establishment of the necessary communications between them. Two measurements are to assign within the limits of coordination: vertical coordination within the limits of decision making hierarchy, horizontal, directed on the regulation of the contradictions in the work of managing objects within the limits of modification their local purpose and interrelations. At such point of view upon the coordination problem the feedback relations occur as the response of elements of organizational structure to the purposes' change and also the information about their achievement extent.

> The main principle which is offered to be applied to a choice of criterion of distribution of the rights and duties between the organizational structure elements and delegations of authorities is based on use of the concept of the home marketing. According to it all elements of organizational structure can be referred to the block corresponding to one of three directions the activities (and the same element can be referred to more than one block according to the character of activity and the position in the technological sequence of operations):





- functional or contact (I);
- providing (O);
- marketing (M).

Functional (contact) elements can be considered as the centers of formation of profit as they render paid services to clients and receive thus the incomes, allowing to compensate realization of external and internal service. charges and to receive profit.

connected with external information resources (processes of their formation and an effective utilization). Internal marketing serves as the tool of intraorganizational coordination within the limits of process of functioning of providing elements at which there are all basic aspects of e organization activity in the external and internal markets.

Both functional and providing elements realize in their activities the functions of internal marketing. The first accept and analyze during rendering services the data on a conjuncture of a home market and its change and about shown and not shown to satisfaction needs of the internal clientele; the second - data on a conjuncture of the home market, connected with the processes of purchases and realizations of resources in the organization.

Generalization of this information and determination of blanks in it is the function of elements of the marketing block. Marketing divisions should estimate reliability of such information and formalize it for transferring to the coordinating body. In this situation the marketing division realizes function of expression of the internal and external marketing information, i.e., not being the center of profit formation, it takes part in realization of the global purpose [4].

Methodological feature of the coordination marketing elements. actions, which are carried out by operating body, is in conditions of a home market their orientation on realization of a problem of management, i.e. on formation of such coordinating influences on process of services rendering to external and internal client, which would provide achievement of the global purpose of management by the best satisfaction of the local purposes.

Let's describe a control system in terms of the theory of coordination. Let the control system be two-level, and as a process is considered services' rendering to the external and internal clients.

In the structure of a coordinating body the solving element is d and a regulator is allocated with C:

$$d: W \rightarrow x$$
;  $C: W \times x \rightarrow E$ ,

Where W - a signal of a feedback - the generated information on results of activity of functional and providing blocks and necessary resources; *x* - demanded coordinating influence; *E* - the information on allocation of resources for

The signal of a feedback is formed as a External marketing activity first of all is composition of signals of a feedback from functional, providing and marketing blocks:

$$W = Wf * Wo * Wm$$

Where Wf - signals of functional elements which are connected first of all with necessity of attraction of resources (internal demand), i.e.

$$Wf_i = Wf(C_i, P_i, I_i, T_i),$$

Where  $C_i$  - necessary volume of additional financial resources;

 $P_i$  - necessary personnel;

 $I_i$  - necessary information;

 $T_i$  - necessary services.

Component Wo - signals of providing elements to coordinating body. Coordinating influences are connected in this case first of all with the internal offering, and also with necessity of change of cost estimation of involved resources and services and their promptness.

The marketing component of signals of feedback *Wm* is formed as a composition:

$$Wm = W^{f} m * W^{o} m * W^{m} m,$$

Where  $W^{f}m$  - the marketing component generated by functional elements (data on a conjuncture of the external and internal markets and its change, and also on the needs of clientele shown and not shown to satisfaction);  $W^{o}m$  - the marketing component generated by providing elements (the external and internal offer);  $W^m m$  an information signal of a feedback from

Basic purpose  $W^m m$  consists in the notice of the coordinating body and in changes of a market situation (a change of a cumulative supply and demand on production (service): in the external and internal markets, and also forecasts of such changes).

Each functional (contact) division contains its own solving element.

The coordinating body chooses its influences in order to balance an external and internal supply and demand on services according to a necessary parity between transaction costs and costs of the control, and a basic element of such coordination is formation of own internal price policy.





Consideration of offered model of the organization management, allows to assume, that the basic way to increase the efficiency of its activity is decentralization.

One of the variants of a substantiation of decentralization in the scheme of organizational structure of management can be the following:

Let's consider process P divided into n+1 local processes, that means decomposition of organizational structure of management.

Subprocesses  $P_i$ , i=1,...,n are identical in the sense that each subprocess  $P_i$  has one input  $m_i$  and two kinds of outputs  $yf_i$  and  $yw_i$ . The special attention should be turned on subprocess  $P_{n+1}$  which connects subprocesses  $P_i$  and also has two kinds of outputs. It is possible to assume, that this subprocess carries out to a certain extent a function of internal  $Pw_{n+1}$  and external  $Pf_{n+1}$  marketing in structure of the organization. Then interactions (resource and mutual service) between subprocesses  $P_n$  are inputs for  $P_{n+1}$  and are set by the equations

$$Uf_i = Kf_i (yf_i,..., yf_n), \qquad 1 \le i \le k,$$

$$Uw_i = Kw_i (yw_i,..., yw_n), \qquad 1 \le i \le s.$$

Thus there is some function of quality (utility) G, which can be used for an estimation of efficiency of functioning of all system. Assuming, that as at the marketing approach functioning of system is focused on the external consumer, the function of quality depends only on outputs of consumption sector  $yf_{n+l'}$   $yw_{n+l'}$  where F - is a foreign market.

For use of this method we shall enter following additional restrictions:

1. The output  $yf_i$  has k as a component:

$$yf_i = (yf_i(1), ..., yf_i(k)).$$

Whereas the output  $yw_i$  has s a component  $yw_i = (yw_i, (1), ..., yw_i, (s)),$ 

Where k and s are integers, the same for all subprocesses.

2. The input of consumption sector  $m_i$  has k as a component:

$$m_{n+1} = (m_{n+1}(1), ..., m_{n+1}(k)).$$

Besides processes  $Pf_{n+1}$  and  $Pw_{n+1}$  are defined by the equations:

$$yf_{n+1}(j) = uf_j + m(j)_{n+1} + cf(j), \quad 1 \le j \le k,$$
  
 $yw_{n+1}(j) = uw_j + m(j)_{n+1} + cw(j), \quad 1 \le j \le s.$ 

3. Interactions are described by the equations:

$$uf_i = \sum_{i=1}^n yf_i(j), \quad 1 \le j \le k,$$

$$uw_i = \sum_{i=1}^n yw_i(j), \quad 1 \le j \le s.$$

The coordinating body can assume independence ("развязанность") of subprocesses from each other and apply a principle of the adjustment/matching of interactions for their co-ordination. Economic interpretation of process of coordination means that quality function of operating elements can be considered, for example, as the profit received from realization of process P. Coordinating parameters thus are the prices of resources or rendered services [7,8].

In order such interpretation is rightful, observance of following conditions is necessary:

$$m_i \ge 0$$
,  $0 \le i \le n+1$   $yf_n+1 \ge 0$ ,  $yw_n+1 \ge 0$ .

Following remarks should be made in connection with applicability of the theory of coordination to activity multilevel hierarchical organizational structures:

- 1. In the theory of the decentralized functioning there is a question on an optimality of the decentralized management and on how to reach optimum coordination for those cases when interaction between divisions is not constructed on strictly competitive basis in view of external influences or in connection with the additional restrictions imposed by a management system for the sake of achievement of the global purposes.
- 2. The basic problem of coordination lies in how to coordinate interactions. It is obvious, that the mechanism of the prices is a special case of a principle of "coordination" which can be used at the certain restrictions, and, the choice of a suitable principle, and also the form of its application depends in many respects on type of the considered organization.

conformity the scheme with decomposition of the functional (contact) block assumes "independence" of internal parameters of production and realization for each of *n* unit of block  $I_{i}$  and also division of streams of made production Y(I), consumed inside organizational structure  $Yd_i$  (I) and shown to foreign market  $Yw_i$  (I), where n - quantity of kinds of production (services), (i = 1,2..., n). The streams of services rendered to internal consumers, are formed as an investigations result of internal marketing and coordinated by a higher body of management.

Each element of the functional (contact) block has, in turn, its complex internal structure, which allows it to carry out its own activity, being





quided by coordinating influences of operating body and considering complex interaction with providing and marketing blocks. By virtue of it, decomposition of such element is realizable.

Each *i*-th element of the block is under the operating influence from coordinating body  $M_i$ . The degree of the purposes achievement of an element is defined on the basis of the feedback themselves. signal  $Z_i$  formed by operating component  $H_i$  of an element under influence  $M_i$  and casual external the coordinating body [10].

Production component  $P_i$  carries out production (services) *Y*, under the influence of an taking into consideration the needs of the external and home market and other elements described by coordinating influence  $M_i$ .

Information component  $H_i$  forms on the basis of connective functions  $U1_{ij}$   $U2_{ij}$  and also qualitative and quantitative parameters of made production or services rendered by an element information signals  $Z_i$  - feedback with coordinating body and  $C_i$  - their transformation for industrial component Pi.

Decomposition of the basic functional (contact) blocks and allocation of the internal connective components in the information streams allow to formalize the procedures of definition of effective coordinating influences from an operating element to all parts of organizational structure.

Thus, it is necessary to draw following conclusion:

- 1. The offered model allows to expand the area of formation of operating (coordinating) influences in the multifilial organization due to use of the decentralized interaction of elements in a home market.
- transport service organizations have a problem of delegation of authorities in their management activities. The main principle which is offered to be applied to the solving of this problem regarding a choice of criterion of the authority delegation, and also distributions of the rights and duties among the elements of organizational structure is based on the use of the concept of internal marketing.
- 3. Internal marketing can serve as the tool of intraorganizational coordination within the limits of unified process of marketing management, which considers all the basic aspects of activity in the external and internal markets.

- 1. One of results of realization of the "Concepts of a home market" are
- " PRACTICAL RECOMMENDATIONS in the field of PERFECTION of SYSTEM MUTUAL SETTLEMENTS of ACCOUNTS of the RAILWAY TRANSPORTATION ENTERPRISES with COUNTERPARTS on BUSINESS and among RAISING the **GENERAL** PROFITABILITY of the BRANCH"

are focused on formation of intermediate influences Q of an environment and directed to (transitive) model of functioning of system of mutual settlements of accounts of the transport enterprises in conditions of a structural reform.

The analysis of the offered scheme allows to environment, and also operating influence  $C_i$  draw a conclusion, that the internal interaction of the system elements is the most complex and it can form the basis for emphasis on this interaction at formation of the financial mechanism in new conditions [9].

> Thus, balances of payments of the first and the second level are formed for the solving of problems of operative management of financial stream movement at a railway departments' level. The consolidated balance of payments of railroad also gives summary balance of branch. The balance of payments is intended for reflection of the inpayments sources as well as the expenditure patterns of all financial resources (in monetary and not monetary forms) [11].

> Using the concept of a home market it is possible to formulate the following conclusions the basic directions' development of perfection of the system of mutual settlements of accounts.

- 1. The analysis of structure of the financial streams of branch tells about the great complexity in the management of the internal relations among the participants of the technological process. The analysis of the offered scheme of 2. Carried out researches have shown, that financial streams allows to draw a conclusion, that the internal interaction of the elements of a system is organized in the most complicated manner that can form the basis for emphasis on this interaction at formation of the financial mechanism in new conditions.
  - 2. Historically internal financial mechanism on railway transportation was formed on the principle of self-financing. The advantage of the self-financing is the formation of internal economic model socially-technical system on the basis of financing, motivations and social development with use of the settlement prices for executed in the whole technological process self-financing



parameter and payment of given basic fixed methodology of a home market with reference to assets.

- 3. It is necessary at restructuring to create a which there would be motives to decrease of its between participants of process as bases of such process and their own activity. motivation.
- 4. The existing control system of economy separate and the finance of railway transportation is based administrative-controlling activity coordination of divisions in conditions of full centralization. Gathering and the analysis of parameters of efficiency, statement of budgeting and of the control have hang-the-expense approach, it does not solve the problem of provision of economic incentives at a level of the linear enterprise, that causes the necessity of a search of other models.

It is offered:

" The TECHNIQUE of FORMATION and INTRODUCTION of SYSTEMS of the CURRENT CONTROL of the FINANCIAL CONDITION of the **ENTERPRISES** of the **RAILWAY** TRANSPORTATION " is based on realization of

the railway enterprises [8].

The technique is focused on reflection of system of economic management of railways in high complexity of interrelations among the enterprises of different branch facilities in costs and to the proved distribution of profit occasion of maintenance of transportation

> For elimination of the conflict among the linear enterprises, facilities and branches, establishments of economically proven interaction, procedure of internal arbitration has been developed. The least average price has been established for a product at the first branch allowing it to work on a foreign market (H) without giving up its efficiency. The greatest average price has been established for the second department, which the second division was ready to pay for a product "X", without reducing the efficiency (L). The following algorithm was used by the decision-making (fig. 1.)

> The use of following model of coordination (fig. 2) is offered at a distribution of the responsibility among levels of management and divisions of one level. The decision, whether to make the transaction internal, or to carry out it on a foreign market was made on the basis of the

> > given model. The increase of the profit of the company as a whole was the common aim.

Thus, it is possible to use internal contracts among elements of the system as the realization mechanism of tasks, which were put by the top level of management. Hierarchy management thus acts as means of distribution of the tasks among the responsibility centers of the on-line, and structural then divisions are responsible for their realization by interaction among themselves on the basis of the internal contract (which can be formal or informal).

The problem can be solved probably on the basis of the offered economic model - the internal (organizational) market, which elements for а railway be transportation should expediently:

- formation of the internal (the transfer price) on the basis of four

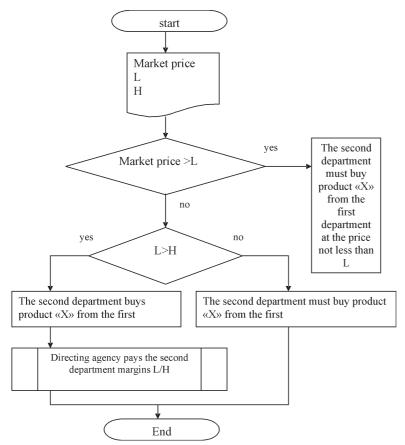


Fig. 1. Algorithm of decision-making at procedure of internal offered concepts and contractual arbitration on the basis of the internal price.



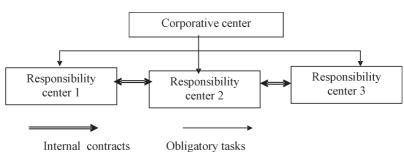


Fig. 2. Distribution of the rights, duties and the responsibility.

attitudes of the linear transport enterprises;

- mutual (cross) interdependence of the linear enterprises;
- obviously rigid binding of suppliers and consumers to each other, that predetermines constant character of relations;
- an opportunity to set the intra-enterprise's prices and the uniform rules of controlling them in divisions in conditions structural with centralization of management high efficiency.

### REFERENCES

- 1. Solskaja I.JU. Internal marketing of financial services (monography) - Irkutsk, 1998. - 16.0
- Solskaja I.JU. Marketing on a securities market // (monography) Printed Irkutsk: ISEA. 1998. - 10.7
- 3. Solskaja I.JU. Concept and methodology of internal marketing in sphere of bank services (monography) - Irkutsk, 1999. - 9.6 p.
- 4. Solskaja I.J., Kurilov A.V. Forming of system hypothecary crediting in (monography) - Irkutsk, 2002. - 12,2 p./ 6,6.
- 5. Solskaja I.JU. Internal homeostat and the model of a home market // (clause). Works of ИСЭМ SA AS of the Russian Federation, 2001.0,5.
- 6. Solskaja I.J., Denisenko E., Sinitsyn L.N. Development of the concept maximarketing: network marketing (monography). Irkutsk. ИД IrSTU, 2002.9,2 / 15. Solskaja I.J., Anoshkina E.V., Eliseev S.V., etc.
- 7. Solskaja I.J., Grosheva N.B. Hierarchical multilevel control system of budgetary process // (clause) Printed Works of the 4-th international scientifically-applied conference. " Economy, ecology and society in Russia in 21-st century ". St.-Petersburg,
- 8. Solskaja I.J., Trubacheev E.V. Concept of management of imbalance of budgetary

- sphere // (clause). Bulletin IrSTU. Series " Institute of economy ". 2002. № 4. p. 23-27.
- Solskaja I.JU. Problem of Formation of transport system of region and the basic directions of scientific researches in the field of economy // Proceedings " Transport problems of Siberian region ". Part 2. Irkutsk: ИрГУПС. 2004. р. 22-26.
- of 10. Solskaja I.J., Soshnev K.V. Wages on railway transport // Proceedings " Transport problems of Siberian region ". Part 2. Irkutsk: ИрГУПС. 2004. р. 26-29.
  - 11. Solskaja I.J., Asalkhanova T.N. Modelling of demand for autoservice services as an element of optimization of planning and management of the enterprises of car-service center // Proceedings "Transport problems of Siberian region ". Part 2. Irkutsk: ИрГУПС. 2004. p. 73-77.
  - 12. Solskaja I.JU. Theory of reforming economic systems and internal homeostat // Modern The technologies. system analysis. Modelling. Scientific magazine. 2004. № 2. p. 126-132.
- region 13. Solskaja I.J., Anchugin A.A. Transformation of the financial mechanism of railway transport (monography) // Irkutsk: ИрГУПС, 2004.119
- 3-rd international seminar on homeostatic. 14. Solskaja I.J., Anchugin A.A. Social aspect of structural reform of a railway transportation: problems of regional development // Modern The technologies. system analysis. Modelling. Scientific magazine. 2004. № 4. p. 126-132.
  - Interaction of the automated multilevel control system and a safety of work of transport systems with a control system of quality of transportation process on the basis of international standards ИСО 9000 // ИрГУПС Ministry of Railways. Irkutsk. 2004. 245p. / Manuscript деп. In ИНИОН the Russian Academy of Science № 58822 from 04.08.2004.





УДК 316.3 Jakobson A. Ya.

# THE GEOPOLITICAL AND MARKETING **BACKGROUNDS OF RUSSIAN-CHINESE RELATIONSHIPS**

Eastern Asia since 17-th century. In 20-th century not want to obtain independence. we can speak about interrelations not in regional but in the global scale. The forms and the plot of these interrelations have changed drastically and not once. The generation living now remembers the times when the two great nations used to be the best friends and later the worst enemies. Now the relationships are quite normal and friendly (which is not the same that "the best friends").

However, it is interesting to determine some theoretical background of these relationships, in order to be able to predict some tendencies in future. Saying this we lean at the hypothesis that both friendship and conflicts of the past were not only the choice of Stalin, Mao Tsetung, Khrushchov, Deng Xiaoping, Gorbachov or other state leaders. There should have been some regularities that prevented to realize either long-term union or war.

a special field of science known as geopolitics. Although existing for more than a century, geopolitics hasn't by now become something universally recognized; it is true not only for the principal notions or regularities but even for the very essence and structure of the science.

trends of a state external policy which are long-term and do not depend on some up-to-date sympathies or antipathies of certain politicians.

One of the fundamental in geopolitics is the notion of an empire. Various features are meant when this word is used. Some of them are principal, some seem to be minor. Thus, such a sphere of interests) are usually used separately. feature as monarchy used to be nearly a synonym of empire but nowadays we often deal with interdependent. And both are linked with the republican empires.

Another important feature believed to be again, nowadays we know a lot of examples when itself is now, after it had lost all its colonies, rather

Russia and China have been interacting in the inhabitants of such a land once conquered do

Some authors treat an empire as a conglomerate of territorial units which differ substantially as for their ethnic structure and historical traditions, usually each having some specific legal rights in the self-government but still being the parts of one state with the priority of imperial (federal) laws and traditions over the regional or local ones.

According to this point of view, all the states of federal type may be called empires. On our opinion, it would be rather reasonable, although perhaps it is not so fruitful when we speak about uninational countries like, say, Ostrich. On the other hand, all multinational countries should be attributed to empires as well, independently of their state form (either federal or unitarian).

Other fundamental notions are sphere (zone) of influence and sphere (zone) of interests. The The regularities of this kind are the subject of former can be defined as a country or a part of a country somehow dependent on certain dominating state. The intensity dependence may vary. It can be a zone of occupation where the whole amount of state power is performed by the dominating state. Sometimes the two countries are united by a On our opinion, geopolitics deals with the treaty which is formally equitable but it is obvious that one of the partners, much more powerful, dominates in this partnership. domination (influence, dependence) is not political or not only political but perhaps financial or cultural.

> The two notions (sphere of influence and Our opinion is that thev are notion of empire.

Indeed, having its own spheres of influence inherent to an empire is that it includes some parts and interests may be treated as an additional conquered once by force and by force held inside feature of an empire. Not all the countries have the empire now. The former is usually true but, them. A good example can be France: the state





homogenous and Unitarian. But French Empire fugitive peasants, merchants, hunters, searchers still exists (without having this name as an official title) and includes all or nearly all ex-colonies. Moreover, it is little use in calling such country as Switzerland, although multinational, an empire: having spheres of influence and interests outside the state territory seems to be an even more important feature than multinationality.

So, empire is, in general case, a complicated formation consisting of parent state, some formally integral parts of the parent state characterized by ethnically different population, overseas colonies and informal sphere of influence, supplemented often by the sphere of interests.

A sphere of interests may be just the same that a sphere of influence or a potential sphere of influence. Very interesting is the question why some territory becomes a sphere of interests of some country. One of the possible answers is that by the beginning of 20-th century, the border it is not only potential but as well a former sphere of influence (or a former colony, or a former part of the country): historical memory makes a state to look at such a territory in this very manner. But such an answer does not seem to be turned into zones of influence of Great Britain, comprehensive.

Indeed, we see that the former colonies of Great Britain, France or Portugal have been still dependent on ex-parent states. Even if we don't mention various financial, commercial migrational linkages, rather important is the fact of wide usage of metropolitan language in these countries.

After this theoretical introduction, let us pass to our two countries.

Russia has been imperial country since 16-th century when the Tsar Ivan the Terrible initialized first increments outside the ethnic territory of Russian people. Unlike most other empires having existed by that time it was a continental one. It is a quite different type of empire. The lands conquered do not have the status of colonies. The metropolitan population feels them as an integral part of the country, not as overseas their historical destiny.

One of the increments of that time was the conquest of Western Siberia. During the next century, the whole Siberia up to the Pacific Ocean had been discovered and colonized by Russian "zemleprokhodtsy" (special word for the category of people who did it, which included Cossacks,

of adventures, travelers, state officers etc).

In the Far East, the "zemleprokhodtsy" approached the borders of Chinese Empire. "Empire" is the traditional word to determine that state in European languages, while "Emperor" is the traditional translation for Chinese "Huangdi". Indeed, China had been an empire for centuries, a continental, highly centralized and multinational one, spreading its cultural influence much broader than that in political sphere. One interesting peculiarity: twice in the last thousand years was China conquered by "barbars" -Mongols and Manchurians. And both times the conquerors founded barbaric dynasties which after some time appeared to be in fact Chinese: the imperial civilization simply "digested" alien influences even in such cases.

After a series of conflicts and peace treaties, between the two empires had been determined. They were not in equal position. Russia was becoming more and more powerful while China weaker and weaker. Some parts of China were France, Germany, Japan and Russia. Russian sphere included Dungbei (after 1905 only its Northern part) as well as Mongolia.

Between 1911 and 1949 China in fact didn't or even exist as a united state. Many provinces were governed by local rulers who ignored the central Government. A good part of the country was under control of Communist Party and its armed forces. Another part was occupied by Japanese troops. Only in September 1949 did China become really independent and united state headed by Communists - allies of the Soviet Union.

As for Russia (by that time the Soviet Union), 1949 was the time of its maximum imperial power. The Soviet empire had included two levels: first, the Soviet Union itself, the borders of which moved apart in 1939-1940 and then in 1945; and its sphere of influence - several European countries, lands, and this difference influences strongly at including Eastern Germany, and Mongolia in Asia. Dungbei, occupied by Soviet Army, although under rule of Beijing Government, also was the part of this sphere.

In these circumstances, it seemed to Stalin that it would be very easy to include the whole China into the Soviet sphere of influence. We shall never know what was Mao Tsetung's opinion on this idea but he did not object. Maybe, he understood that it was Stalin's great mistake and





Maybe, at that time, he was mistaken too.

But why do we say the idea of including China into the Soviet sphere of influence was a great mistake? Just because China is an empire by its nature, as well as Russia. An empire may be to ex-Soviet countries. This interest is informal, conquered, it may be divided into parts, it may be turned into a colony or destroyed at all. But while it exists as a united and independent state, never will it be a part of some other state's sphere of influence. Moreover, it will seek to form such a sphere itself. This seems to be a geopolitical law (regularity), confirmed by the historical experience of many countries of this type. However, history knows several exceptions when part of Russian sphere of interests. sometime imperial country has lost this status without remnants (Poland, any Netherlands) but they

are scarce. By the way, this very experience demonstrates that at the same time there may exist zones of alien influence on some part of the territory of an empire.

China and the Soviet Union needs a detailed analysis. But we state that one of the reasons of seeking to realize its imperial potential and the imperial policy of Soviet Government treating China as its zone of influence.

Just one comment. Other countries of Soviet sphere of influence might also reject or try to reject this influence. But, as historical experience shows, their seeking independence was in fact seeking to enter the sphere of influence of some other country or a group of countries. Obviously, this is not so in the case of China.

Passing to our days, can we say that the two countries are not more than independent subjects of international law and nothing prevents them to answer doesn't seem to be simple. It should consist of answers at many important questions.

First of all, does contemporary Russia have its exist, coincide in some localities?

interests. After the crash of the Soviet Union, Russia lost the lands connected with it by numerous economic flows, by cultural traditions, humanitarian contacts. of Russian-speaking people live in new independent when Kazakhstan itself does not belong to Russia states, having become an ethnic minority. Two

was going just to wait when it becomes obvious. kinds of migrational flows from these countries to exist: one is emigration Russia Russian-speaking, the other is labor migration, predominantly of native population.

> All these factors cause the interest of Russia there is no formulated policy in this direction. But nobody will insist that, say, Kazakhstan is for Russia just a foreign country, a subject of diplomatic relations and international trade.

> More complicated is the question about the countries which used to be dependent on Soviet Union although formally independent, including Mongolia. As for the latter, it seems to remain a

Less obvious is the interest of China to both Ostrich, Mongolia (which used to be a part of Chinese empire) and the countries of Middle Asia. But this interest exists and is manifested in trade contacts, in investments, etc. So, it can be stated that, in some space, Russia and China compete.

A still more acute question: don't Russia and Certainly, the history of the conflict between China have any zones of interests on the territory of each other?

Russia did have such zones in China. One of this conflict was contradiction between China's them was Dungbei. In the beginning of 20-th century it was such a zone officially (as it was already said, later Russia lost its Southern part but saved the North). The end to Russian presence here was put by Stalin in early 50-s. The Russian population was forced to return to Russia, Soviet Army also returned home, the railroad and military bases were transferred to China.

> This may seem strange, as nobody can call Stalin so kind and unselfish. Perhaps saving this regional zone of influence didn't seem significant to him, as he hoped to spread his influence at the whole China.

However, now there are practically no signs become good and long-term partners? The of former Russian presence in this region. It is a theoretical problem, whether ex-sphere influence can become sphere of interests in such a case. But Russian chelnoki (small wholesale sphere of interests? Second, does China have merchants buying goods in China and bringing such a sphere? Third, do these spheres, if they them to Russia) prefer to deal with this very region, as well as Russian tourists. Perhaps there Undoubtedly, Russia does have its sphere of exists some interest to Dungbei in Russia, although not very strong.

> Another zone of interests could be Xinjang (Uiguristan), the native population of which is congener to the peoples of Middle Asia. But now,





and is not more than a zone of interests for it, Russia seems to have no interests in Xinjang.

And what about Chinese interests in Russia? There are a lot of Chinese people in Russia today: merchants, agricultural and forestry workers, students, etc. Their presence is determined geographically: mostly in Vladivostok and problems. According to Primorye, very many in other territories conterminous with China, than still fewer and fewer to the West. We can say that Southern parts of Siberia and the Far East are the field of Chinese migration, of Chinese goods import and, perhaps, in the nearest future, of Chinese investments. Doesn't it mean Chinese interests?

We have used the word "compete" speaking about Chinese and Russian interests in Middle Asia and Mongolia. Competition may bring to conflicts. The existence of Chinese interests in Russian territory and vice versa is still more fraught with conflicts.

Some people in Russia believe that Chinese immigration is dangerous for Russia. It may be and cultural changes and afterwards by territorial but only cooperate. But it doesn't sound very convincing.

is a central notion of market economy. Some well. market actors compete with some others. This is market. Competition sometimes brings to conflicts. These conflicts may take a very acute, even criminal form. But it is not obligatory, mutual projects. competition assumes that competitors are partners. Having each their own projects interests, they compete in the framework of law corridor. Having possibility to transport goods by and ethics. Sometimes their interests coincide, railway through the continent instead of sea way this is a real reason for cooperation. Civilized around Asia would be beneficial for most competitors understand that they need each countries involved. China and Russia have a other, that the failure of the partner is not in their specific interest, as the corridor will pass the interests.

Here it is time to recollect one idea which is not popular in today's Russia but maybe has not interests come to contradiction. been forgotten in China. It is the idea of socialist emulation. In the Soviet Union, it appeared in 20-s existing Trans-Siberian road. This variant will and was in the very beginning a real initiative of need some new investments, but much less than people masses. Later, like many other ideas of any other one. Again, to the East of Baikal, this 20-s, it became subject of bureaucratization but in variant consists of fore roots: the beginning it did work. Help your comrades and do your work trying to be best - this is the Russian territory; principal slogan of socialist emulation.

However, there may be various forms of competition - from socialist emulation to criminal methods. Most important is that two actors who just cannot be anything other than competitors can choose civilized forms.

Now let us look again at geopolitical their geopolitical situation, Russia and China are competitors in the geopolitical market and cannot be anything other. By the way, Japan is one more competitor, as it belongs to the same imperial type, while Korea and Mongolia are not.

Nothing prevents these countries to compete in civilized, friendly manner. Nothing prevents to respect each other's interests until these interests come into contradiction with one's own national interests. It is important to be ready for such a situation, not to react at it as a tragedy: competition is competition. And there exists such a civilized form of behavior at a competitive market as marketing.

Study the market demand, adapt your followed, they say, by significant demographic production to it, promote this production with the help of branding, price policy, advertising, public claims. It is very easy to proclaim that our peoples relations, etc., organize the system of sales and are good friends now, that they do not compete merchandizing, do it as perfectly as possible and do not be afraid of competitors! This is the slogan of marketing, and it is actual not only in Let us discuss the very idea of competition. It commercial competition but in geopolitical one as

At the same time, there is a vast field for determined by the niches they occupy in the cooperation of competitors. When we speak about Russia and China, we mean mutually beneficial trade, investments and especially

> One of the most important among such is Trans-Eurasian transportation territories of both countries. But there are different variants of the root, and here some

The most realistic variant is to use the already

- from Eastern ports of Russia, using only





- from Chinese ports, through Dungbei and then Russia;
- from Southern Korea, through Northern Korea and then using one of the two previous
- from Central and Southern provinces of China, through Mongolia and Russia.

The principle alternative variant avoids Siberia. It goes through Chinese territory to the West, then through Kazakhstan, Uzbekistan, again Kazakhstan and European Russia.

The variants avoiding Russia at all (but not avoiding China) are still less realistic, but they

So, we see that comparative interests of the two countries in different variants are not equal. But mutual interests can be found.

For example, if Russia is interested in the Trans-Siberian roots, it can promote this variant in China. And China, in turn, can promote the root from Korea through Chinese territory.

One of the most important and complicated marketing problems is that of image. The image of Chinese production is very low in Russia. It is understandable: Russian consumer has got used to cheep Chinese goods with the quality respective to price, bought in Chinese markets or from Russian chelnoki who had brought them directly from China. Now there exist companies that are ready to import from China the goods of highest quality but they meet consumers' misunderstanding, something like this: "What? Chinese and so expensive?"

In this case, those are Russian companies that are interested in promotion, but Chinese side shouldn't be passive as well.

We know too little about Russian image in today's China (we have just started investigations in this direction). But if Russia wants to attract Chinese investments we must do much for promoting our positive image.

Толстых О.Д., Гозбенко В.Е.

УДК 681.3:[001+62+33]

## СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕСТОВОЙ БАЗЫ «КОМПЛЕКСНЫЕ ЧИСЛА»

функции комплексного переменного находят зиция. Диапазон количества аудиторного вреширокое применение в картографии, электро- мени, отведенного на раздел «Комплексные технике, аэро- и гидродинамике, теории фи- числа. Теория функций комплексного перельтрации почв, теоретической физике, теории менного» по рабочим программам достаточно упругости, в расчетах различных конструкций на прочность, в квантовой механике, при изучении движения спутников и т.д. Геометрическая интерпретация комплексных чисел альностях; 52 часа на специальности ЗИ (защиспособствовала их широкому распространению. Использование комплексных чисел и функций комплексного переменного в реальных задачах позволяет избежать многих противоречий и упростить техническую сторону при решении задач. К примеру, эффективный метод расчета цепей переменного тока осноплексные числа являются базовой основой теории аналитических функций.

В связи с этим при создании тестовой базы

В настоящее время комплексные числа и были выделены в структуре, как отдельная поширок: 12-14 часов на экономических специальностях, УПП (управление процессами перевозок); 16-20 - на общетехнических специта информации).

> Такой большой разброс в количестве аудиторных часов требует достаточно подробной детализированной структуры. Предложенная автором структура по комплексным числам приведена в приложении.

Тестовая база по комплексным числам сован на применении комплексных чисел и держит 423 задания теоретического и практифункций комплексного переменного. Ком- ческого характера, в том числе заданий на установление порядка -1; заданий открытой формы - 75; заданий закрытой формы - 197; заданий на установление соответствия - 150. Папо высшей математике комплексные числа кет тестовых заданий содержит перечень ис-





список.

Как видно из структуры, в тестовой базе отражены основные понятия, алгебраическая, показательная и тригонометрическая формы комплексных чисел; переходы от одной формы задания комплексного числа к другой; действия над комплексными числами в различных формах. Достаточно большое внимание уделено геометрической интерпретации комплексных чисел и действиям с ними в различных формах, а также изображению областей на комплексной плоскости.

В тестовой базе выделены отдельные блоки на стыке с другими разделами высшей мате- 4. матики: алгебраические уравнения, комплексные числа в определителях.

С одной стороны этим решается задача логических взаимосвязей между различными разделами тестовой базы, с другой стороны, кроме стандартных задач хотелось представить задачи разного уровня сложности.

Тестовая база, разработанная в соотве- 8. тствии с приведенной структурой, дает возможность преподавателю подготовить тест, который позволит оценить глубину освоения темы и осознанность применения студентом основных понятий, фактов.

Наполнение тестовой базы достаточное как для одновременного тестирования подгруппы 15-17 человек, так и для тестирования группы 25-30 человек. Подробная структура позволяет решить следующие задачи:

- ПОДГОТОВИТЬ дифференцированный тест для более слабых и более сильных студентов;
- подготовить тест для промежуточного контроля по теме «Комплексные числа»;
- выбрать необходимый минимум позиций для итоговой аттестации по семестру, по разделу «Теория функций комплексного переменного»;
- подготовить тест в зависимости от количества аудиторного времени, выбирая позиции в соответствии с рабочей программой для конкретной специальности.

Исходя из выше сказанного, следует отметить, что тестовая база по комплексным числам позволяет преподавателю решить проблему, как промежуточного контроля знаний, так и итоговой аттестации студентов разных спе- 14. циальностей, оценить глубину усвоения мате-

пользуемых терминов, понятий, обозначений, риала, дать достаточно объективную оценку и основных типов задач, библиографический рекомендации по устранению выявленных пробелов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

### Структура и содержание тестовой базы «Комплексные числа».

Комплексные числа. Список терминов, понятий, обозначений, фактов, основных типов задач. Тестовые задания:

- Теоретические вопросы;
- Алгебраическая форма комплексных чисел. Основные понятия;
- 3. Действия с комплексными числами в алгебраической форме;
- Тригонометрическая и алгебраическая формы комплексных чисел;
- 5. Показательная и алгебраическая формы комплексных чисел;
- Соответствие между различными фор-6. мами комплексного числа;
- Геометрическая интерпретация комплексных чисел в различных формах;
- Действия над комплексными числами в показательной и тригонометрической формах;
- 9. Алгебраическая форма комплексных чисел и их геометрическое изображение;
- 10. Комплексные числа в тригонометрической форме и их геометрическое изображение;
- Комплексные числа в показательной форме и их геометрическое изображе-
- 12. Соответствие между множествами комплексных чисел и их изображением на комплексной плоскости;
- Алгебраические уравнения;
- 13.1. Квадратные уравнения (открытая форма);
- 13.2. Квадратные уравнения (на тствие);
- 13.3. Кубические уравнения вида  $z_3 + a = 0$ (закрытая форма);
- 13.4. Уравнения вида z4-о=0 (открытая форма);
- 13.5. Уравнения вида г4-а=0 (закрытая фор-
- 13.6. Биквадратные уравнения (открытая фор-
- 13.7. Биквадратные уравнения (на соотве-
- Комплексные числа в определителях;





- 14.1. Комплексные числа в алгебраической 14.5. Определители второго порядка и комформе и определители второго порядка;
- 14.2. Уравнения с определителями и комплексные числа в алгебраической форме;
- 14.3. Комплексные числа в алгебраической форме и определители третьего порядка;
- 14.4. Определители второго порядка и комплексные числа в показательной форме;
- плексные числа в тригонометрической форме;
- 14.6. Определители третьего порядка и комплексные числа в показательной форме;
- 14.7. Определители третьего порядка и комплексные числа в тригонометрической форме.





## Раздел 1 Механика. Транспорт. Машиностроение

## УДК 621.311

Гапанович В.А., Махутов Н.А. Решение проблем конструкционной прочности и техногенной безопасности на железнодорожном транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.6-9.

Рассматриваются принципиальные вопросы стратегии развития системы нормативно-правового и научного обеспечения в концепции развития железнодорожного транспорта. Определены основные проблемы, решение которых необходимо при формировании многокритериальных подходов федерального уровня к созданию и безопасному функционированию перспективного подвижного состава и инфраструктуры.

Библ. — 8 наим.

#### УДК 656.001

**Хоменко А.П., Елисеев С.В.** Динамические модели механических цепей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.9-15.

В статье развиваются подходы к построению динамических моделей механических цепей на основе формализма общего уравнения динамики и использования теоремы Лурье о переставимости конечных поворотов к вариациям обобщенных координат. Предлагаются алгоритмы решения первой задачи динамики, а также процедуры непосредственного определения обобщенных ускорений и реакций дополнительных связей.

*Илл.* — 1. Библ. — 10 наим.

#### УДК 656.001

**Засядко А.А.** Электрогидравлические виброзащитные системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.16-23.

Автором рассматриваются принципы построения виброзащитных систем, имеющих в своем составе гидравлические исполнительные механизмы с управляемым золотниковым механизмом. Управляющий сигнал формируется цепью, состоящей из датчика состояния объекта защиты и устройства преобразования сигнала по определенному закону. Выбор закона управления определяет эффективность работы электрогидравлической виброзащитной системы в определенном частотном диапазоне.

Илл. -7. Библ. -10 наим.

#### УДК 693.546.4

**Быкова Н.М., Каргапольцев С.К., Пыхалов А.А., Милов А.Е.** Некоторые принципы разработки конечно - элементных моделей тоннелей в структурно-неоднородных горных массивах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.24-30.

Представлены решения двух задач. Первая — состоит в получении основных зависимостей МКЭ и построении конечно-элементной глобальной модели тоннеля. Вторая задача состоит в проведении анализа полученной модели с учетом напряженно-деформированного состояния при действии гравитационной нагрузки и температурных полей.

Илл. - 7. Библ. - 5 наим.

## АННОТАЦИИ ОПУБЛИКОВАННЫХ СТАТЕЙ





#### УДК 693.546.3

**Белокобыльский С.В., Кашуба В.Б.** Особенности контактного взаимодействия вибрирующих рабочих органов с бетонной поверхностью в технологиях заглаживания // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.31-37.

Рассматриваются физические основы построения математических моделей контактного взаимодействия вибрирующего рабочего органа со средой. Показано, что различные особенности контакта требуют соответствующих математических моделей. В целом, процесс формирования контактных усилий определяется совместным или интегральным эффектом сложения различных видов движений: высокочастотных вибраций рабочего органа и колебаний рабочего органа, вызванных упругими свойствами конструкции. Рассматривается оригинальное техническое средство с магнитострикционным вибратором.

Илл. -4. Библ. -9 наим.

#### УДК 656.001

**Елисеев С.В., Упырь Р.Ю.** Рычажные связи в передаче механических воздействий заглаживания // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.38-46.

Предлагается подход к оценке особенностей привносимых введением в механическую колебательную систему рычажных связей. Рассмотрены случаи введения в систему одного, двух и более рычагов, получены выражения для определения приведенных жесткостей системы. Рычажным схемам рассматриваемых систем сопоставлены структурные интерпретации в виде структурных схем эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления (САУ) и дуальных механических цепей.

Илл. -17. Библ. -6 наим.

#### УДК 624.19.551.248

Тирский О.Н., Быкова Н.М., Мироманов И.А., Хрюкин Ю.А. Выделение водонасыщенных пластов в заобделочном пространстве тоннелей электроразведочными методами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.47-51.

Приведены результаты обследования Северо-Муйского тоннеля методами симметричного электрического профилирования (СЭП) и естественного электрического поля. Выделены три типа пород по характеристикам сопротивления, в отношении которых сделаны рекомендации по оценке водонасыщения.

Илл. - 7. Библ. - 3 наим.

#### УДК 620.22

Ванчиков В.Ц., Холмогоров И.В. Сдвиговая прочность граничного слоя при обтекании жидкости твердой подложки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.52-56.

Предлагается математическая модель процесса увеличения толщины неподвижного граничного слоя жидкости в случае облитерации капилляра. На основе механизма облитерации жидкости в капиллярах можно реализовать принцип послойной укладки микрочастиц в наноструктурированые материалы.

Илл. -1. Tабл. -1. Библ. -7 наим.

#### УДК 621.09.014

Соболев В.И., Соболев И.В. Конечно-элементный экспресс-анализ сейсмических нагружений в задачах обеспечения безопасности многоэтажных зданий и сложных сооружений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.57-62.

Изложена методика оперативного анализа сейсмического нагружения многоэтажных зданий, позволяющая осуществлять подсказку улучшения вариантов на этапе реализации планировочного решения здания. Представлена технология инженерного анализа и расчета напря-





женно-деформированного состояния конструкций при различных сочетаниях нагрузок, ориентированная на на дискретизацию конструкции и использование оригинальных программных средств виде программного комплекса «BRIS».

 $U_{\Lambda\Lambda}$ . — 8. Библ. — 5 наим.

#### УДК 539.62; 621.646; 621.891

**Огар П.М., Горохов Д.Б., Ключев Е.А.** Герметизирующая способность стыка фрактальных шероховатых поверхностей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.63-65.

Определена плотность зазоров и герметизирующая способность стыка фрактальных шероховатых поверхностей в зависимости от фрактальной размерности и числа гармоник.

Илл. -2. Библ. -2 наим.

#### УДК 531.44

**Огар П.М., Ключев Е.А., Максимова О.В.** Упругая характеристика слоистой полуплоскости // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) C.66-68.

Определена упругая характеристика слоистой полуплоскости при нагружении ее герцевской нагрузкой в зависимости от отношения толщины покрытия к полуширине площадки нагружения.

Илл. -4. Библ. -6 наим.

#### УДК 625.1.033

Четвертнова В.В. Оценка влияния внешних факторов на работу протяженных транспортных объектов с позиции системного подхода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.69-72.

С позиции автора системный подход в решении задачи эксплуатационной надежности железнодорожного пути требует учета ряда дополнительных факторов, влияющих в реальных условиях на его работу. К таким факторам, учитывая значительную протяженность рассматриваемого объекта, можно отнести фактор неоднородности геологической среды, фактор, отражающий сложность инженерно-геологических условий прохождения железной дороги. Предлагается модель системы и база выходных данных многовариантных её поведений при варьировании входными параметрами.

 $U_{\Lambda\Lambda}$ . — 2. Табл. — 1. Библ. — 9 наим.

# Раздел 2 Управление в технических системах. Моделирование

#### УДК 621.311

Махутов Н.А., Гаденин М.М. Многоуровневое регулирование и обеспечение безопасности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.74-86.

Предложены и развиты концептуальные основы создания системы обеспечения безопасности в сложных ситуациях в техносфере на основе расчета рисков и поиска безопасных ситуаций в пространстве управляемых параметров. Определены научные направления обеспечения прочности, ресурса и техногенной безопасности.

Илл. -8. Библ. -20 наим.

## АННОТАЦИИ ОПУБЛИКОВАННЫХ СТАТЕЙ





#### УДК 681.518

Sugisaka M., Loukianov A.A., Xiongfeng F., Kubik T., Kubik K.B. Development of an artificial brain LifeRobot // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.87-95.

Рассматриваются возможности построения системы управления робота на основе искусственного интеллекта для решения задач, возникающих в системах сервисного обслуживания, оказания помощи больным, сбора данных и т.д. Приведена информация о принципах построения схем управления и программных средств.

 $U_{\Lambda\Lambda}$ . — 13. Табл. — 2. Библ. — 15 наим.

#### УДК 685.327(07);62-503.3

Марюхненко В.С., Комогорцев М.Г., Трускова Т.В. Пути предотвращения критических состояний на транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.-Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.96-102.

В статье рассмотрены основные причины возникновения чрезвычайных ситуаций на транспорте. Характеризовано влияние человека на систему управления транспортным средством. Предложены способы уменьшения риска возникновения критических и предотказных состояний на транспорте.

 $U_{\Lambda\Lambda}$ . — 4. Табл. — 1. Библ. — 10 наим.

#### УДК 656.001

**Елисеев С. В., Упырь Р.Ю.** Особенности параллельных соединений в механических цепях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. -  $\mathbb{N}^{\underline{o}}$  2(14) С.102-113.

Рассматриваются вопросы изменения динамических свойств колебательных систем, структурные интерпретации которых представлены структурными схемами эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления (САУ) и дуальными механическими цепями. Предложены способы получения приведенных характеристик на основе технологии «разнесения» общего шарнира в параллельных соединениях двух элементов с введением рычажного устройства.

Илл. - 4. Tабл. - 8. Библ. - 4 наим.

#### УДК 621.311

**Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Сузгаев М.В.** Особенности моделирования износа изоляции тягового трансформатора // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.114-118.

В задаче контроля износа витковой изоляции силовых трансформаторов тяговых подстанций есть два существенных аспекта: исходные данные представлены в виде получасовых значений расхода активной и реактивной электроэнергии по трехфазным вводам; тяговая нагрузка характеризуется существенной несимметрией. Первый аспект ввиду малой постоянной времени нагрева обмотки обусловливает необходимость перехода к эффективным получасовым значениям тока, а второй аспект требует пофазного учета нагрузок. Одному из возможных путей преодоления этих трудностей и посвящена настоящая статья. На основе данных об электропотреблении, получаемых из автоматизированной системы учета электроэнергии, возможен непрерывный мониторинг износа силовых трансформаторов. Представленная методика позволяет производить пофазный контроль износа по данным электропотребления на тягу поездов и расходам электроэнергии нетяговыми потребителями.

Илл. - 2. Библ. - 3 наим.





# Раздел 3 Экономика. Инновации. Социально-экономические исследования

#### УДК 001.4.658.382.3: 006.354

Хоменко А.П., Каштанов Ю.Б., Елисеев С.В. Основы стратегии и тактики управления региональным центром мониторинга, прогнозирования и управления безопасности транспортных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.120-133.

Рассматриваются научные основы стратегии развития системы обеспечения безопасности для транспортной системы в ее сложных проявлениях в ее сложных проявлениях в виде искусственных сооружений (тоннели, мосты и т.д.). Определен перечень основных направлений деятельности и методов научной поддержки, развиты организационно-технологические аспекты деятельности регионального центра.

Илл. - 6. Библ. - 10 наим.

#### УДК 338.47

Solskaya I.Y. Structural reform of transport and fundamental research in economics // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. - № 2(14) С.134-140.

Структурное реформирование транспортных систем предполагает развитие методологии управления в новых экономических условиях. Это связано с формированием филиальной сети, изменением механизма определения финансовых результатов, схем взаимодействия подразделений. Такие практические разработки должны базироваться на результатах фундаментальных исследований в области экономики и менеджмента.

Илл. - 2. Библ. - 15 наим.

#### **УΔК 316.3**

**Jakobson A. Ya.** The geopolitical and marketing backgrounds of Russian-Chinese relationships // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. -  $\mathbb{N}$  2(14) С.141-145.

В статье рассмотрены история и проблемы российско-китайских отношений с позиций геополитики. Показано, что две страны, в силу особенностей своей истории, культуры и географии, являются естественными конкурентами на мировой арене. Но конкуренция вполне может осуществляться цивилизованными маркетинговыми методами. Параллельно разбираются теоретические вопросы геополитики, конкуренции и маркетинга.

#### УДК 681.3:[001+62+33]

**Толстых О.Д., Гозбенко В.Е.** Структура и содержание тестовой базы (комплексные числа) // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск. ИрГУПС. - 2007. -  $\mathbb{N}^2$  2(14) С.145-147.

Статья посвящена описанию структуры и содержания тестовой базы по теме «Комплексные числа». Приведено описание наполнения и решаемые задачи в рамках предлагаемой тестовой базы, включая подготовку дифференциальных тестов и тестов для промежуточного контроля знаний студентов.





## НОВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

В 2006 году в издательстве Иркутского государственного университета была выпущена монография «Dynamics of Mechanical Systems with Additional Ties» - авторский коллектив: Eliseev S.V., Lukyanov A. V., Reznik Yu. N. and Khomenko A. P. ( на англ. языке).

Монография посвящена систематическому изложению вопросов, связанных с особенностями введения в колебательные механические системы дополнительных связей. При этом механическая колебательная система, состоящая из массоинерционного элемента, пружины и демпфера, интерпретируется как эквивалентная в динамическом отношении система автоматического управления.

Такая структурная схема содержит прямые и обратные связи, а внешние воздействия рассматриваются как входные сигналы. На этой основе получены обобщенные постановки задач виброзащиты и виброизоляции оборудования, развиты специфичные методы динамического синтеза систем, обладающих новыми свойствами.

#### **UDC 62-531**

Dynamics of Mechanical Systems with Additional Ties / Eliseev S.V., Lukyanov A. V., Reznik Yu. N. and Khomenko A. P. - Irkutsk: Irkutsk State University, 2006. - 315 p.

#### ISBN 5-02-028739-3.

This monograph is devoted to problems of safeguarding equipment and instrumentation against vibrations and impacts. We explore some possibilities of expanding the gamut of dynamical properties of mechanical vibratory systems when special-purpose mechanisms are introduced into their structure to form additional ties. Emphasis is placed on effects brought about by mechanisms used for transforming the relative motion as well as by active facilities based on electrical and hydraulic automatic equipment. Dynamical features of multi-link rod systems.

The book is intended for specialists in the field of vibration and impact protection of objects.

Tables 4. 111.: 128, Bibliography: 126 Titles. Reviewed by

Drs. Sc. (Techn.)

Yu. M. KRAKOVSKY and V. I. SOBOLEV

In view of technical re-equipment of National economy and of converting it to an active way of development, machine engineering industry faced serious challenges. Resolving them involves designing, manufacturing and operating different machines, mechanisms and instruments which optimize labour productivity and automation.

A distinctive feature of modern machines includes high capacities, high operational processes, and significant dynamical loads. Their operation is accompanied by vibrations and impacts. Undesirable vibrations disturbs the laws of motion of machines and mechanisms, leads to system failures and its destruction, and gives rise to an instability of the processes. Vibrations increase dynamical loads in structural elements, introduce changes into the internal structure of materials and surface layers, leads to increased wear on contact surfaces of machines' parts, and induces noise and a large number of other undesirable effects.

Vibration effects on the human body decrease man's functional capabilities and labour productivity, and long-duration effects are able to cause the total loss of the capacity for work. Alternatively, vibration is widely used in industry and civil construction for intensifying a large variety of manufacturing processes.

In view of increased requirements for vibration protection and for the quality of vibratory processes, the main issues becoming of particular interest are the development of new procedures, methods and designs which make it possible to effectively control vibrations used and to minimize undesirable vibrations.

One of the promising approaches to developing an apparatus of analysis and synthesis of vibration protection systems have become structural methods which were used to conceive a number of original technical proposals which involve introducing into vibratory systems additional ties of a passive and active character. This method of changing dynamic properties of vibratory involves, for example, introducing additional inertial elements into their structure via mechanisms of conversion of motion. A typical





feature of these systems is that additional inertial elements produce a force that depends on parameters of the relative motion. This leads to a substantial transformation of the system s dynamic properties, namely, there is a decrease in the frequency of natural vibrations, there arise conditions for dynamic damping due to a kinematic perturbation, etc.

Mechanically, additional inertial elements with mechanisms of motion conversion are made in the form of non-self-braking helical pairs and lever or other devices.

The field of these systems possible application is quite diverse: vibration isolation of instruments, equipment and tools, devices designed for changing the vibration field structure in mechanisms, and others.

Structural methods of investigation to be developed in this work do not rule out the use of

alternative approaches; moreover, they need them when it is necessary to take into account some particular properties of mechanical systems, for instance, incorporation of rod elements or nonlinearities. In such a case it is advisable to do a complex investigation based on accessible resources and to use the applied program software which carries out dialog procedures of automated design and research.

This book also addresses results derived by investigating dynamic properties of mechanical vibratory systems which include nontraditional elements and additional links and is a continuation of work described in monographs [35, 46].

We are grateful to Drs A.A. Zasyadko, N.K.Kuznetsov, who participated in the conduct of theoretical and experimental investigations.

Вышла из печати монография к. т. н. Ванчикова В. Ц. «Управление слоем трения в технологических процессах». ИрГУПС, 2006. - 169 с.

Основу этой монографии составили теоретические и экспериментальные работы автора, обобщающие разрозненные сведения о характерных особенностях веществ на расстояниях порядка нанометров, использование которых, дает возможность создать совершенно новые технологические приемы, связанные с материаловедением, механикой и многими другими областями науки.

В первой главе «Поверхность твердого тела в слое трения» дан краткий анализ видов связи микрочастиц в твердых телах. Отметим, что в нанобиологии, наномедицине и нанотехнологии чрезвычайно возрос интерес к слабым Ван-дер-Ваальсовым силам притяжения микрочастиц.

Во второй главе «Жидкости в слое трения» рассмотрена вода как объект для проведения гидродинамического эксперимента.

В третьей главе «Течение жидкости в слое трения» показано, что силы адгезии являются важным фактором, который приводит к возникновению облитерации капилляра в технических устройствах, фильтрационного эф-

фекта в пористых элементах технических средств. Дана классификация видов течения жидкости, в которой приведен, обнаруженный автором, особый вид ламинарного течения.

В четвертой главе «Экспериментальное определение существование особого режима ламинарного течения жидкости» рассмотрены нанообъекты в граничном слое жидкости. На основе принципов действия приборов физической химии, установки по изучению режимов течения жидкости Рейнольдса, прибора Дарси, а также опытов Амонтона-Морена создан прибор для определения силы когезии жидкости, протекающей в зоне действия силы адгезии твердого тела в наноразмерном удалении от твердого поверхности.

В пятой главе «Течения вязкой жидкости в капиллярах» приведены результаты исследования зависимости изменения расхода жидкости от времени в случае облитерации капилляра. Определено значение числа Рейнольдса, равное  $2\pi$ , при котором наблюдается переход ламинарного течения в особый вид, характеризуемый прилипанием жидких частиц потока к неподвижному граничному слою жидкости.





В шестой главе «Ламинарный граничный слой жидкости» показано, что силы внутреннего трения, выражающие действие вязкостных напряжений, в уравнениях Навье-Стокса в случае облитерации капилляра содержат члены, отражающие макроскопическое событие: действие сил адгезии, скорости течения жидких частиц и безразмерный параметр, обозначающий микроскопическое событие: увеличение толщины неподвижного граничного слоя. Для понимания базовых процессов, происходящих в нанопространственно-временных масштабах, преобразована формула Гагена-Пуазейля. Преобразование этой формулы дало возможность увидеть аналогию сил когезии микрочастиц ламинарного потока к неподвижному граничному слою жидкости с процессами перколяции и критических явлений. Более того, позволило определить впервые энергию связи молекулы воды в неподвижном граничном слое.

Глава седьмая «Контактные силы при особом режиме ламинарного течения жидкости» посвящена исследованию общности контактных сил.

В главе восьмой «Управление особым режимом ламинарного течения жидкости» впервые рассмотрены 12 способов изменения толщины неподвижного граничного слоя жидкости. Приведены результаты экспериментов воздействия на неподвижный граничный слой жидкости с помощью ультразвука и электротока.

В главе девятой «Особый режим ламинарного течения жидкости в технологических процессах» приведены результаты экспериментов использования ультразвука в технологии пропитки якорей тяговых электродвигателей локомотивов, а также использование ультразвука для пропитки обмоток электродвигателей, изготовленных из эмальпровода. Разработаны: способ увеличения точности работы вычислительных управляющих И устройств гидроавтоматики; способ нанесения информационных знаков в электрокаплеструйной технологии; условие, при котором соблюдается режим стабильной работы капиллярных насадок.

По вопросам приобретения монографий обращаться по тел.: 8-(395-2)-59-84-28, 8-(395-2)-63-83-14 к Богатову Максиму Юрьевичу.

Адрес: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского 15, офис А101.

e-mail: <u>eliseev s@inbox.ru</u>





# СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Бардушко Валерий Данилович,

д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электроснабжения железных дорог» ИрГУПС

#### Белокобыльский Сергей Владимирович,

д.т.н., профессор, ректор БрГТУ

#### Быкова Наталья Михайловна,

к.т.н., доцент, зав. каф. «Мосты и транспортные тоннели» ИрГУПС

### Ванчиков Виктор Цыренович,

к.т.н., докторант ИрГУПС

#### Гаденин Михаил Матвеевич,

к.т.н., в.н.с., Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, РАН

#### Гозбенко Валерий Ерофеевич,

д.т.н., профессор ИрГУПС

#### Горохов Денис Борисович,

к.т.н., доцент БрГТУ

## Елисеев Сергей Викторович,

д.т.н., профессор, исп. директор НИИ Современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС

#### Жмуров Владимир Витальевич,

аспирант БрГУ

#### Закарюкин Валерий Пантелеймонович,

к.т.н., доцент ИрГУПС

#### Каргапольцев Сергей Константинович,

д.т.н., профессор, проректор ИрГУПС

## Ключев Евгений Александрович,

аспирант БрГТУ

#### Кобзов Дмитрий Юрьевич,

к.т.н., доцент, БрГУ

#### Комогорцев Максим Геннадьевич,

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» ИрГУПС.

#### Кашуба Владимир Богданович,

аспирант БрГТУ

#### Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., профессор ИрГУПС

#### Лукьянов Андрей Анатольевич,

д.т.н., с.н.с. ИрГУПС

### Максимова Ольга Владимировна,

аспирант БрГТУ

#### Марюхненко Виктор Сергеевич,

к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» ИрГУПС.

#### Махутов Николай Андреевич,

член-корреспондент РАН, зав. отделом института машиноведения РАН

### Гапанович Валентин Александрович,

Вице-президент ОАО "РЖД"

### Милов Александр Евгеньевич,

инженер-программист, аспирант ИрГТУ

#### Мироманов Илья Андреевич,

аспирант ИрГТУ

## Московских Александр Олегович,

аспирант ИрГУПС

## Огар Петр Михайлович,

д.т.н., профессор БрГТУ

## Плешивцева Светлана Викторовна,

аспирант БрГУ

### Пыхалов Анатолий Александрович,

к.т.н., доцент, начальник «ИрГТУ-MSC/ NASTRAN Центра», ИрГТУ

## Ситов Илья Сергеевич,

аспирант БрГТУ

#### Соболев Владимир Иванович,

д.т.н., профессор ИрГТУ

## Соболев Иван Владимирович,

гл. специалист ЗАО НПП «СПЕКТР»

### Сольская Ирина Юрьевна,

д.э.н., профессор, директор института  $\Delta\Pi O$  ИрГУПС

#### Сузгаев Максим Валерьевич,

зам. начальника Абаканской дистанции электроснабжения ОАО РЖД

#### Тарасов Вячеслав Анатольевич,

доцент БрГТУ

## Тирский Олег Николаевич,

к.ф.-м.н., профессор ИрГУПС

### Толстых Ольга Дмитриевна,

к.ф.-м.-н., доцент ИрГУПС

## Трускова Татьяна Валерьевна,

ФГУП «Аэропорт Иркутск», медикосанитарная часть, врач высшей категории

#### Упырь Роман Юрьевич,

аспирант ИрГУПС

## Сведения об авторах





Холмогоров Игорь Владимирович,

аспирант ИрГУПС

Хоменко Андрей Павлович,

д.т.н., профессор, ректор ИрГУПС

Хрюкин Юрий Александрович,

к.т.н., доцент ИрГУПС

Четвертнова Вера Васильевна,

ст. преподаватель, соискатель ИрГУПС

Якобсон Анатолий Яковлевич,

д.г.н. профессор ИрГУПС

Kubik K.B.,

сотрудник университета г. Иото (Япония)

Kubik T.,

сотрудник университета г. Иото (Япония)

Sugisaka M.,

сотрудник университета г. Иото (Япония)

Xiongfeng F.,

сотрудник университета г. Иото (Япония)





## Уважаемые читатели!

«Современные технологии. Системный анализ. Моделирование» - журнал ИрГУПС, включен в "Перечень ВАК", Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям "Ulrich's Periodicals Directory".

Сообщаем Вам о продолжении на первое полугодие и открытии подписки на 2 полугодие 2008 года. Наш подписной индекс в каталоге "Почта России" - 51544.

Оформить **подписку** на научный журнал можно во всех почтовых отделениях России в любой рабочий день.

	_					_				5154		_
	АБОНЕМЕНТ					на журнал					4	
	(индекс издания)											
	«Современные технологии.									)		
	Системный анализ.							комплект.				
	Моделирование»											
	на 2008 год по месяцам:											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			$\mathbf{X}$			X			$\mathbf{X}$			X
	Куда											
	(адрес)											
Кому												
(фамилия, инициалы)												
	доставочная карточка							1				
						на журнал				I 51544		
	П	В	мест	лите	0		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	31344				
	(индекс издания)											
	«Современные технологии. Системный											
анализ. Моделирование»												
	Стон-		поді	иски		рубкоп. <b>К</b> оличество						
	мо	мость		пере адресовки						плектов		
	на 2008 год по месяцам:											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			X			X			X			X
Куда				•								
(почтовый индекс) (адрес)												
Кому												
(фамилия, инициалы)												



Министерство Образования и Науки Российской Федерации

Министерство Транспорта Федеральное агентство железнодорожного транспорта



Иркутский государственный университет путей сообщения Российская инженерная академия

## Современные технологии

Систем/ный \анализ

Моде/лиров\ание

 $\frac{\sqrt{2}}{2}$   $\frac{14}{2}$ 

# НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск С.В.Елисеев

Подписано в печать 13.10.2007. Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. Печ. л. 19. уч.-изд. л. 19,5. Тираж 500 экз. Заказ № Подписной индекс по каталогу «Почта России»: 51544

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям "Ulrich's Periodicals Directory"

ИД №06506 от 26.12.01

Иркутский государственный университет путей сообщения 664074, г. Иркутск, уд. Чернышевского, 15.

Отпечатано в ООО ПО Ангарская городская типография, г. Ангарск, ул. Мира, 18.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ №13-0574 от 24 декабря 2003 г. Учредитель Иркутский государственный университет путей сообщения (664074, г. Иркутск, ум. Чернышевского, 15)