Министерство Образования и Науки Российской Федерации

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

МОДЕЛИРОВАНИЕ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№1(13)
2007

© Иркутский Государственный Университет Путей Сообщения

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 открывает этим выпуском публикацию научных результатов, полученных в современных направлениях исследований, связанных с проблемами мехатроники, защиты оборудования от вибраций и ударов, применению методов математического моделирования для оценки технического состояния сложных объектов.

Примечательным фактом в деятельности журнала является публикация подборки материалов обследования и изучения особенностей Северо-Муйского тоннеля, что представлено в статьях, авторами которых стали сотрудники Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутского государственного технического университета, академических институтов ИНЦ СО РАН, служб ВСЖД.

Вопросы экономики и сбережения энергетических ресурсов стали предметом внимательного изучения в работах проф. Крюкова А.В., Бардушко В.Д., что подтверждает важность ориентации на актуальные проблемы железнодорожной отрасли.

Математическое моделирование постепенно расширяет границы применения своих методов в нетрадиционных сферах деятельности, что получило отражение в статьях проф. Краковского Ю.М., Гозбенко В.Е., Носкова С.И., Елисеева С.В., Хоменко А.П.

Анализ научных публикаций за 2006 год показывает устойчивую направленность на актуальные проблемы промышленно-производственного и социально-экономического развития региона, освещению специфичных проблем, связанных с развитием транспортных систем области, что, как полагает редакция, будет поддержано в работе журнала в течение текущего 2007 года.

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 сообщения

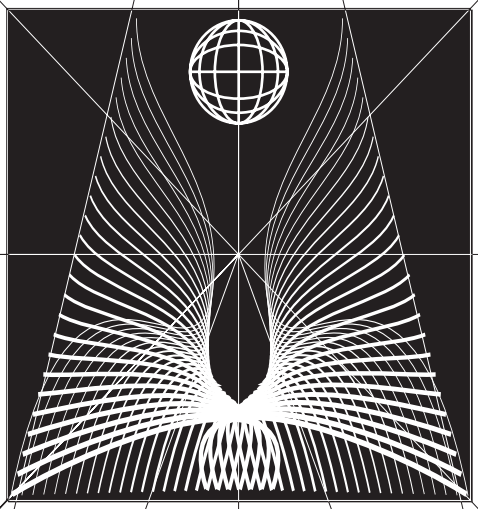
© Издательство Иркутского Государственного Университета Путей Сообщения

Министерство Образования и Науки Российской Федерации

Министерство Транспорта
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№1(13)
2007

Редакционная коллегия

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

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

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

Журнал издается с 2004 г.

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

© Издательство Иркутского Государственного Университета Путей Сообщения

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. Механика. Транспорт. Машиностроение. Технологии

Елисеев С.В., Хоменко А.П. Формирование точностной модели механической цепи манипулятора 6

Кузнецов Н. К., Перелыгина А. Ю. Управление колебаниями трехмассовой системы 14

Свитачев А. И., Орловский С.Н. Анализ динамических свойств силовых передач лесохозяйственных агрегатов с активными рабочими органами 19

Засядко А.А., Упырь Р.Ю., Логунов А.С. Некоторые подходы к задачам динамического синтеза механических колебательных систем 23

Быкова Н.М., Зайнагабдинов Д.А. Математическое моделирование работы тоннельных обделок с учетом геодеформационных воздействий в зонах разломов земной коры 37

Ситов И.С., Белокобыльский С.В. Способы и средства изменения динамического состояния технического комплекса для вибрационного заглаживания 46

Синеговская Т.С. Вычисление дифференциальной вероятности распадов частиц 52

Зиновьев А.А., Люблинский В.А., Белых С.А., Бурашников А.А. Обоснование основных требований и выбор материалов для ремонта путевого бетона и бетона обратного свода Северо-Муйского тоннеля 55

Ковенькин Д.А., Ливенцев Е.А., Домбровский Ю.П. Экспериментальное исследование работы рельсовых скреплений типа оп-105 и кб-65 при проходе подвижного состава на участках Северо-Муйского тоннеля 64

Быкова Н.М., Исайкин А.С., Моргунов А.Н., Зайнагабдинов Д.А. Измерения деформаций в стенах обделки и путевом бетоне Северо-Муйского тоннеля с использованием фотоупругих датчиков 69

Дамбаев Ж.Г., Новосельцев В.П., Новосельцев П.В. Экспериментальное исследование процесса трогания с места железнодорожного состава 74

Печенкина В.В., Арбатская Н.А. Анализ и моделирование основных показателей работы железных дорог 78

Соколова О.В., Марынич Д.С. Влияние сил морозного пучения на деформации железнодорожного полотна 82

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 2. Управление в технических системах. Моделирование

Елисеев С.В., Засядко А.А., Упырь Р.Ю. Новый подход в оценке возможностей последовательного соединения элементов в структурных интерпретациях механических колебательных систем 88

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Модели автотрансформаторов для расчета режимов электрических систем в фазных координатах 100

Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Анализ электромагнитного влияния силового кабеля на подземный трубопровод 104

Краковский Ю.М., Воложанина О.А. Анализ стратегического положения групп специальностей на рынке образовательных услуг Читинской области 110

Демьянов В.В., Комогорцев М.Г., Марюхненко В.С. Оценка качества навигационных определений при решении прикладных задач 115

Краковская Т.А., Тюрнев А.С. Сравнительный анализ программных родуктов для маркетинговых исследований 120

Рябов Е.В., Китов Б.И., Мухачев Ю.С. Автоматизация рентгенорадиометрического процесса доводки концентратов 127

Носков С.И. Попытка первичного формального анализа результатов экзаменационной сессии 131

Раздел 3. Экономика. Инновации. Социально-экономические исследования

Khomenko A.P., Solskaya I.Y. The project approach to preparation of transport engineers 134

Толстых О.Д., Гозбенко В.Е. Усиление эффективности обучения высшей математики в техническом вузе и организация самостоятельной работы студентов 139

Степин А.Г. История геологических изысканий в районе Северо-Муйского тоннеля и проблемы его эксплуатации 141

Толстых О.Д., Гозбенко В.Е. Структура и содержание тестовой базы по классическим разделам и специальным главам высшей математики 148

Юбилеи и даты 151

Аннотации опубликованных статей 158

Сведения об авторах 164

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

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

К статье прилагаются:

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

!2) индексы УДК или ББК;

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

!4) реферат по образцу:

УКД 621.879

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

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

Ил. 2. Табл. 2. Библ. 7 наим.

Количество знаков в реферате - не более 400.

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

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

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

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

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

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

По вопросам публикации статей обращаться:

г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15. Офис А-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@iriit.irk.ru

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

Раздел 1.

Механика. Транспорт. Машиностроение.

Содержание научного журнала:

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

Елисеев С.В., Хоменко А.П.

УДК 519.95

ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТНОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МАНИПУЛЯТОРА

Под точностной моделью будем понимать уравнения, определяющие ошибки положения и ориентации звеньев, обусловленные первичными ошибками обобщенных координат и геометрических параметров системы. В отличие от известных методов построения точностных моделей механизмов [1,2], основанных на линеаризации функций положения, в настоящей статье будет выведен алгоритм, учитывающий также члены второго порядка малости и построенный на основе теории конечных поворотов [3].

Рассмотрим две конфигурации свободной от связей системы:

$$\varphi \underline{\underline{\Delta}} \left(\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_k\right)^T \text{ и } \varphi' = \varphi + \Delta\varphi, \qquad (1)$$

где

$\Delta\varphi = \left(\Delta\varphi_1, \ldots, \Delta\varphi_k\right)^T$, $\Delta\varphi_i = \eta_i \Delta q_{\lambda_i} + \left(1 - \eta_i\right)\Delta p_{\lambda_i}$, Δq_{λ_i} — ошибки обобщенных координат, Δp_{λ_i} — ошибки параметров.

В конфигурации φ' ориентации систем координат, задаваемые векторами $\overline{\mathrm{T}}'_k, \ldots, \overline{\mathrm{T}}'_k$, находятся из рекуррентных соотношений

$$\overline{T}'_i = \overline{T}'_{\pi_i} \oplus \overline{\Phi}'_i$$

$$\overline{T}_i = \overline{T}_{\pi_i} \oplus \overline{\Phi}_i = \frac{\overline{T}_{\pi_i} + \overline{\Phi}_i + \overline{T}_{\pi_i} \times \overline{\Phi}_i}{1 - \overline{T}_{\pi_i} \cdot \overline{\Phi}_i}, \ \overline{T}_0 = 0, \qquad (2)$$

где $\overline{\Phi}_i = \overline{e}'_i tg\varphi'_i / 2 \underline{\underline{\Delta}} \overline{\Phi}_i\left(\overline{e}'_i, \varphi'_i\right)$.

Символ $\oplus$ введен для обозначения операции сложения конечных поворотов. В классической механике векторы конечных поворотов определяются для углов $0 \le \varphi_i < \pi$. Для учета произвольных углов поворота в [4] рассмотрены необходимые частные случаи применения формулы.

Введем в неподвижной системе координат вектор $\overline{P}_i = \overline{\upsilon}_i tg\chi_i / 2$ конечного поворота, совмещающего системы координат s_i и s'_i, такой, что $\overline{\mathrm{T}}'_i = \overline{\mathrm{T}}_i \oplus \overline{\mathrm{P}}_i$.

В силу ассоциативности конечных поворотов будем иметь $\overline{\Phi}_i\left(\overline{e}_i, \varphi_i\right) \oplus \overline{\mathrm{P}}_i = \overline{\mathrm{P}}_{\pi_i} \oplus \overline{\Phi}'_i$. Действительно, с одной стороны, $\overline{\mathrm{T}}'_i = \overline{\mathrm{T}}'_i \oplus \overline{\mathrm{P}}_i = \overline{\mathrm{T}}_{\pi_i} \oplus \overline{\Phi}_i \oplus \overline{\mathrm{P}}_i$, а с другой - $\overline{\mathrm{T}}'_i = \overline{\mathrm{T}}'_{\pi_i} \oplus \overline{\Phi}'_i = \overline{\mathrm{T}}_{\pi_i} \oplus \overline{\mathrm{P}}_{\pi_i} \oplus \overline{\Phi}'_i$.

Учитывая далее, что при повороте $\overline{P}_{\pi_i}$ вектор $\overline{e}_i$ переходит в $\overline{e}'_i$, и применяя теорему Лурье о переставимости конечных поворотов, получим

$$\overline{\mathrm{P}}_{\pi_i} \oplus \overline{\Phi}_i\left(\overline{e}'_i, \varphi'_i\right) = \overline{\Phi}_i\left(\overline{e}_i, \varphi'_i\right) \oplus \overline{\mathrm{P}}_{\pi_i},$$

$$\overline{\Phi}_i\left(\overline{e}_i, \varphi'_i\right) = \overline{\Phi}_i\left(\overline{e}_i, \varphi_i\right) + \frac{\overline{e}_i}{\cos^2\left(\varphi_i / 2\right)} \cdot \frac{\Delta\varphi_i}{2} + \frac{tg\left(\varphi_i / 2\right)}{\cos^2\left(\varphi_i / 2\right)} \left(\frac{\Delta\varphi_i}{2}\right)^2 \overline{e}_i + O\left(\Delta\varphi_i^3\right)\overline{e}_i. \qquad (3)$$

Поскольку с точностью до малых второго порядка включительно справедливо тождество $\overline{\Phi}_i\left(\overline{e}_i, \varphi'_i\right) = \overline{\Phi}_i \oplus \Delta\overline{\Phi}_i$, где $\Delta\overline{\Phi}_i = \delta_i e_i \Delta\varphi_i / 2$, в силу ассоциативности конечных поворотов будем иметь $\overline{P}_i = \Delta\overline{\Phi}_i \oplus \overline{P}_{\pi_i}$.

Используя в качестве характеристики точности ориентации системы координат s_i вектор угла поворота $\overline{\theta} = \overline{\upsilon}_i \chi_i$, такой, что с точностью до малых второго порядка включительно $\overline{\theta}_i = 2\overline{\mathrm{P}}_i$ и, представляя $\overline{\theta}_i$, в виде $\overline{\theta}_i = {}^1\overline{\theta}_i + {}^2\overline{\theta}_i$, где ${}^1\overline{\theta}_i$ и ${}^2\overline{\theta}_i$ соответствуют ошибкам первого и второго порядков малости, получим рекуррентные формулы прямого прохода для определения ошибок ориентации:

$${}^1\overline{\theta}_i = {}^1\overline{\theta}_{\pi_i} + \delta_i \Delta\varphi_i \overline{e}_i, \ {}^1\overline{\theta}_0 = 0,$$

$${}^2\overline{\theta}_i = {}^2\overline{\theta}_{\pi_i} + \frac{1}{2}\,{}^1\overline{\theta}_{\pi_i} \times \delta_i \Delta\varphi_i \overline{e}_i, \ {}^2\overline{\theta}_0 = 0. \qquad (4)$$

При исследовании ошибок позиционирования дополнительно, в качестве первичных ошибок, будем учитывать неточность задания вектора $\overline{O_i R_i}$ в осях i-й системы координат:

$\Delta\left\{\overline{O_i R_i}^{(i)}\right\} \underline{\underline{\Delta}} \left\{\tilde{\Delta}\overline{O_i R_i}\right\}^{(i)}$, где символом $\tilde{\Delta}$ обозначен относительный дифференциал в осях подвижной системы координат. Для построения рекуррентных соотношений построим формулу, связывающую абсолютные и относительные дифференциалы с точностью до членов второго порядка малости включительно.

Пусть некоторый постоянный вектор $\bar{\rho}$, поворачиваясь на угол $\Delta\varepsilon$ относительно вектора $\bar{u}$, переходит в $\bar{\rho}'$. Применяя формулу Родрига, получим выражение для приращения вектора $\bar{\rho}$:

$$\Delta\bar{\rho} = \sin\Delta\varepsilon\left(\bar{u}\times\bar{\rho}\right) + \left(1-\cos\Delta\varepsilon\right)\left\{\bar{u}\times\left(\bar{u}\times\bar{\rho}\right)\right\}.$$

Полагая, что с точностью до малых второго порядка включительно приращение угла поворота, рассматриваемого как функция некоторого параметра t, есть частичная сумма дифференциалов $\Delta\varepsilon = {}^1\Delta\varepsilon + {}^2\Delta\varepsilon$, и учитывая, что вектор угла поворота $\theta = {}^1\bar{\theta} + {}^2\bar{\theta} = \Delta\varepsilon\cdot\bar{u}$, для составляющих $\Delta\rho$ разложением в ряд будем иметь:

$${}^1\Delta\bar{\rho} = {}^1\bar{\theta}\times\bar{\rho},\ {}^2\Delta\bar{\rho} = {}^2\bar{\theta}\times\bar{\rho} + \frac{1}{2}\,{}^1\bar{\theta}\times\left({}^1\bar{\theta}\times\rho\right).$$

Вводя далее переменный вектор $\bar{a}(t) = a_x(t)\bar{i}(t) + a_v(t)\bar{j}(t) + a_z(t)\bar{k}(t)$, заданный в подвижной системе координат с ортами $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$, и вычисляя с точностью до малых второго порядка его абсолютные дифференциалы, после преобразований получим:

$${}^1\Delta\bar{a} = {}^1\tilde{\Delta}\bar{a} + {}^1\bar{\theta}\times\bar{a},\ {}^2\Delta\bar{a} = {}^2\tilde{\Delta}\bar{a} +$$

$$+{}^2\bar{\theta}\times\bar{a} + \frac{1}{2}\,{}^1\bar{\theta}\times\left({}^1\bar{\theta}\times\bar{a}\right) + {}^1\theta\times{}^1\tilde{\Delta}\bar{a}.$$

${}^1\Delta\bar{a}$— относительные дифференциалы, учитывающие изменения $\bar{a}$ только в подвижной системе координат.

Пусть в инерциальном пространстве задана точка R_m и известны проекции вектора $\overline{O_m R_m}$ на оси базиса $s_m = \overline{O_m R_m}^{(m)} = const$.

Требуется найти координаты этой точки в базисе s_o: $\overline{O_o R_m}^{(o)}$. Как следует из рис. 1, в зависимости от направления прохода дерева цепи вектор $\overline{O_o R_m}$ определяется последовательным применением рекуррентных формул прямого (вдоль пути от s_o к s_m)

$$\overline{O_0 O_i} = \overline{O_0 O_{\pi_i}} + \left(1-\delta_i\right)\varphi_i\bar{e}_i,\ \overline{O_0 R_m} = \overline{O_0 O_m} = \overline{O_m R_m} \tag{5}$$

или обратного (вдоль пути от s_m к s_{π_m} и т. д. к s_o)

$$\overline{O_{\pi_i} R_m} = \left(1-\delta_i\right)\varphi_i\bar{e}_i + \overline{O_i R_m} \tag{6}$$

прохода дерева цепи. Проецируя (5) на оси s_o или же (6) на оси π_i-й системы координат, получим рекуррентные формулы для определения функций положения точки R_m в базовой системе. Кроме того, проецируя (5) на оси i-й системы координат или же (6) на оси m-й системы координат, образуем рекуррентные формулы для вычисления вектора $\overline{O_0 R_m}$ в осях связанной системы координат s_m .

Применяя формулы (2), (3), (4) к соотношениям (5) и учитывая, что по определению первичных ошибок $\Delta\varphi_i = {}^1\Delta\varphi$, $\tilde{\Delta}\overline{O_i R_i} = {}^1\tilde{\Delta}\overline{O_i R_i}$, запишем рекуррентные формулы прямого прохода для ошибок позиционирования:

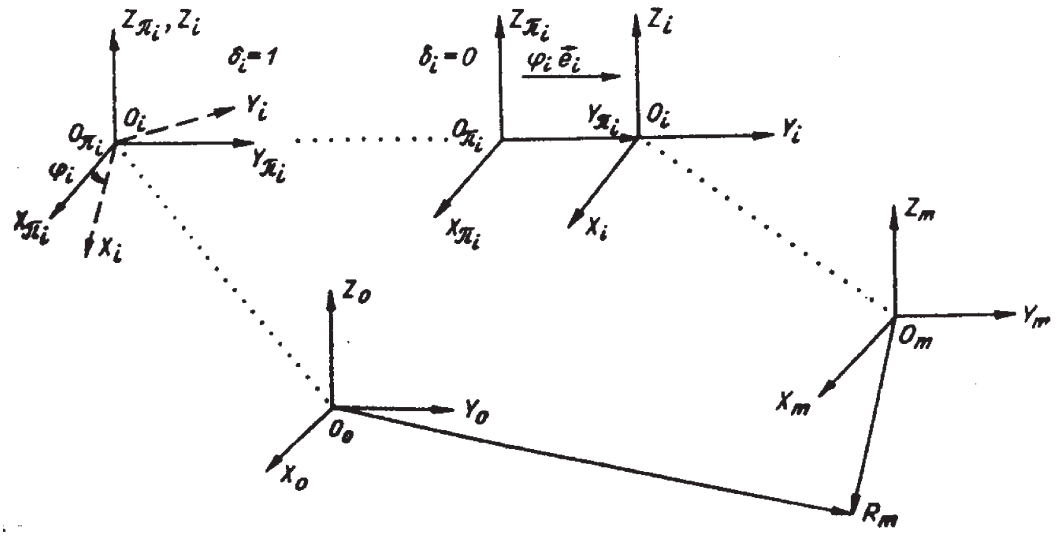


Рис. 1. Цепочка систем координат.

$$
\begin{gathered}
{}^1\Delta O_0 O_i = {}^1\Delta O_0 O_{\pi i} + (1-\Delta_i)\left\{ {}^1\theta_{\pi_i}\varphi_i e_i + \Delta\varphi_i e_i \right\}, \\
{}^2\Delta\overline{O_0 O}_i = {}^2\Delta\overline{O_0 O}_{\pi i} + (1-\delta_i)\cdot \\
\cdot\left\{ {}^2\overline{\theta}_{\pi_i}\times\varphi_i\overline{e}_i + \frac{1}{2}\,{}^1\overline{\theta}_{\pi_i}\times\varphi_i\overline{e}_i + {}^1\overline{\theta}_{\pi_i}\times\Delta\varphi_i\overline{e}_i \right\},
\end{gathered}
\tag{7}
$$

$$
{}^1\Delta\overline{O_o R}_i = {}^1\Delta\overline{O_o O}_i + {}^1\overline{\theta}_i\times\overline{O_i R}_i + \Delta\overline{O_i R}_i,
$$

$$
{}^2\Delta\overline{O_o R}_i = {}^2\Delta\overline{O_o O}_i + {}^2\overline{\theta}_i\times\overline{O_i R}_i + \frac{1}{2}\,{}^1\overline{\theta}_i\left({}^1\overline{\theta}_i\times\overline{O_i R}_i\right)\times
$$

$$
\times\,{}^1\overline{\theta}_i\times\tilde{\Delta}\overline{O_i R}_i .
$$

Аналогичным образом при рассмотрении уравнений (6) получаются рекуррентные формулы обратного прохода для ошибки позиционирования и ориентации системы координат

$$
\begin{gathered}
{}^1\left\{ {}^{\pi_i}\overline{\theta}_m \right\} = {}^1\left\{ {}^{i}\overline{\theta}_m \right\} + \delta_i\,\Delta\varphi_i\,\overline{e}_i, \quad {}^1\left\{ {}^{m}\overline{\theta}_m \right\} = 0. \\
{}^2\left\{ {}^{\pi_i}\overline{\theta}_m \right\} = {}^2\left\{ {}^{i}\overline{\theta}_m \right\} + \frac{1}{2}\delta_i\,\Delta\varphi_i\,\overline{e}_i\times{}^1\left\{ {}^{i}\overline{\theta}_m \right\}, \\
{}^2\left\{ {}^{m}\overline{\theta}_m \right\} = 0, \\
{}^1\Delta\overline{O_{\pi_i} R}_m = (1-\delta_i)\Delta\varphi_i\,\overline{e}_i + \delta_i\,\Delta\varphi_i\,\overline{e}_i\times\overline{O_i R}_m + {}^1\Delta\overline{O_i R}_m, \\
{}^1\Delta\overline{O_m R}_m = \tilde{\Delta}\overline{O_m R}_m, \\
{}^2\Delta\overline{O_{\pi_i} R}_m = {}^2\Delta\overline{O_i R}_m + \delta_i\,\Delta\varphi_i\,\overline{e}_i\times{}^1\Delta\overline{O_i R}_m + \\
+\frac{1}{2}\delta_i\,\Delta\varphi_i^2\,\overline{e}_i\times\left(\overline{e}_i\times\overline{O_i R}_m\right).
\end{gathered}
\tag{8}
$$

Здесь ${}^i\overline{\theta}_m = {}^1\left\{ {}^{i}\overline{\theta}_m \right\} + {}^2\left\{ {}^{i}\overline{\theta}_m \right\}$ — вектор угла поворота системы координат s'_m относительно s_m, вычисляемый в предположении, что s_i условно неподвижна (принята за стойку), $\Delta\overline{O_i R}_m = {}^1\Delta\overline{O_i R}_m + {}^2\Delta\overline{O_i R}_m$. При реализации вычислительных алгоритмов уравнения (7) проецируются на оси систем координат s_o или s_i, а уравнения (8) на оси s_{π_i} или s_m.

Для выражения в замкнутой форме точностных характеристик как квадратичных функций ошибок обобщенных координат и параметров, расширим набор векторных коэффициентов влияния первого порядка аналогами вектора бесконечно малого поворота системы координат s_i и вектора линейной ошибки позиционирования $\overline{d}_k^i = \partial\left\{\overline{O_o R}_i\right\}/\partial p_k$ точки R_i по k-му параметру. Аналогично $\overline{a}_k^i$ и $\overline{b}_k^i$ имеют место формулы

$$
\begin{gathered}
\overline{c}_k^i = \zeta_{i,\mu_k}\delta_{\mu_k}\overline{e}_{\mu_k}, \\
\overline{d}_k^i = \zeta_{i,\mu_k}\left\{(1-\delta_{\mu_k})\overline{e}_{\mu_k} + \delta_{\mu_k}\overline{e}_{\mu_k}\times\overline{O_{\mu_k} R}_i\right\}.
\end{gathered}
\tag{9}
$$

Далее, введем в рассмотрение дополнительный набор коэффициентов влияния второго порядка. Применяя правила дифференцирования векторов, связанных с подвижными системами координат, в контексте выбранного способа формализации кинематических цепей, получим следующие выражения:

$$
\begin{gathered}
\overline{c}_{kl}^i = \begin{cases} \overline{c}_k^i\,\overline{c}_l^i & при\ \mu_k < \mu_l, \\ 0 & при\ \mu_k \ge \mu_l, \end{cases} \\
\overline{d}_{kl}^i = \begin{cases} \overline{c}_k^i\times\overline{d}_l^i & при\ \mu_k < \mu_l, \\ \overline{c}_l^i\times\overline{d}_k^i & при\ \mu_k > \mu_l, \end{cases} \\
\overline{f}_{kl}^i = \begin{cases} \overline{c}_k^i\times\overline{a}_l^i & при\ \mu_k < \upsilon_l, \\ 0 & при\ \mu_k > \upsilon_l, \end{cases} \\
\overline{h}_{kl}^i = \begin{cases} \overline{a}_k^i\times\overline{c}_l^i & при\ \upsilon_k < \mu_l, \\ 0 & при\ \upsilon_k > \mu_l, \end{cases} \\
\overline{u}_{kl}^i = \begin{cases} \overline{c}_k^i\times\overline{b}_l^i & при\ \mu_k < \upsilon_l, \\ \overline{a}_l^i\times\overline{d}_k^i & при\ \mu_k \ge \upsilon_l, \end{cases}
\end{gathered}
\tag{10}
$$

причем, как нетрудно убедиться, для данных коэффициентов справедливы следующие тождества:

$$
\overline{d}_{kl}^i = \overline{d}_{lk}^i, \quad \overline{c}_{kl}^i - \overline{c}_{lk}^i = \overline{c}_k^i\times\overline{c}_l^i, \quad \overline{f}_{kl}^i - \overline{h}_{lk}^i = \overline{c}_h^i\times\overline{a}_l^i.
$$

Для определения характеристик точности в замкнутом виде поступим следующим образом. Раскладывая выражение для в ряд Тейлора и удерживая в нем члены не выше второго порядка малости, будем иметь

$$
\begin{gathered}
\Re_i(q+\Delta q, p+\Delta p) = \Re_i(q,p) + \sum_{k=1}^{n}\left(\partial\Re_i/\partial q_k\right)\Delta q_k + \\
+\sum_{k=1}^{m}\left(\partial\Re_i/\partial p_k\right)\Delta p_k + \sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}\left(\frac{\partial\Re_i}{\partial p_k\,\partial q_l}\right)\Delta p_k\,\Delta q_l + \\
+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}\left(\frac{\partial^2\Re_i}{\partial q_k\,\partial q_l}\right)\Delta q_k\,\Delta q_l + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}\left(\frac{\partial^2\Re_i}{\partial p_k\,\partial p_l}\right)\Delta p_k\,\Delta p_l.
\end{gathered}
\tag{11}
$$

Используя известные в кинематике твердого тела соотношения

$$
\Omega\left(\overline{\omega}_i^{(i)}\right) = \Re_i^T\,\dot{\Re}_i, \quad \Omega\left(\overline{\varepsilon}_i^{(i)}\right) = \Re_i^T\,\ddot{\Re}_i + \Re_i^T\,\dot{\Re}_i,
$$

нетрудно показать, что частные производные матрицы ориентации $\Re_i$ выражаются через коэффициенты влияния первого и второго порядков:

$$\begin{aligned}
&\partial\Re_i \,/\, \partial q_k = \Re_i \Omega\left(\tilde{a}_k^i\right), \partial\Re_i \,/\, \partial p_k = \Re_i \Omega\left(\tilde{c}_k^i\right),\\
&\partial^2 \Re_i \,/\, \partial q_k \partial q_l = \Re_i \left\{\Omega\left(\tilde{a}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\tilde{a}_l^i\right)\Omega\left(\tilde{a}_k^i\right)\right\},\\
&\partial^2 \Re \,/\, \partial p_k \partial q_l = \Re_i \left\{\Omega\left(\tilde{c}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\tilde{c}_l^i\right)\Omega\left(\tilde{c}_k^i\right)\right\},\\
&\partial^2 \Re \,/\, \partial p_k \partial q_l = \Re\left\{\Omega\left(\tilde{f}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\tilde{a}_l^i\right)\Omega\left(\tilde{c}_k^i\right)\right\},
\end{aligned} \tag{12}$$

где $\left\{\overline{a}_k^i\right\}^{(i)} \underline{\underline{\Delta}}\ \tilde{a}_k^i$ и т.д. Подставляя (10) в (11), найдем матрицу ориентации N_i системы координат s'_i относительно s_i такую, что $\Re\left(q+\Delta q, p+\Delta p\right) = \Re\left(q, p\right)N_i$. Она имеет вид

$$\begin{aligned}
N_i &= E + \sum_{k=1}^{n}\Omega\left(\overline{a}_k^i\right)\Delta q_k + \sum_{k=1}^{n}\Omega\left(\overline{c}_k^i\right)\Delta p_k +\\
&+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\left\{\Omega\left(\tilde{a}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\tilde{a}_l^i\right)\Omega\left(\tilde{a}_k^i\right)\right\}\Delta q_k \Delta q_l +\\
&+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\left\{\Omega\left(\tilde{c}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\tilde{c}_l^i\right)\Omega\left(\tilde{c}_k^i\right)\right\}\Delta p_k \Delta p_l +\\
&+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\left\{\Omega\left(\tilde{f}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\tilde{a}_l^i\right)\Omega\left(\tilde{c}_k^i\right)\right\}\Delta p_k \Delta q_l .
\end{aligned} \tag{13}$$

Соответствующий матрице N_i вектор конечного поворота в осях системы координат s_i запишется формулой [5]

$$\overline{P}_i^{(i)} = \left(N_i - N_i\right)^T \,/\, \left(1 + trN_1\right).$$

Сохраняя в этом выражении члены второго порядка малости и заменяя при данном предположении вектор конечного поворота на вектор угла поворота, будем иметь $\overline{\theta}_i^{(i)} = \left(N_1 - N_1^T\right) / 2$. Вычисляя N_i^T и учитывая, что

$$\begin{aligned}
&2\Omega\left(\overline{a}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\overline{a}_l^i\right)\Omega\left(\overline{a}_k^i\right) - \Omega\left(\overline{a}_k^i\right)\Omega\left(\overline{a}_l^i\right) = \Omega\left(\overline{a}_{kl}^i + \overline{a}_{lk}^i\right),\\
&2\Omega\left(\overline{c}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\overline{c}_l^i\right)\Omega\left(\overline{c}_k^i\right) - \Omega\left(\overline{c}_k^i\right)\Omega\left(\overline{c}_l^i\right) = \Omega\left(\overline{c}_{kl}^i + \overline{c}_{lk}^i\right),\\
&2\Omega\left(\overline{f}_{kl}^i\right) + \Omega\left(\overline{a}_l^i\right)\Omega\left(\overline{c}_k^i\right) - \Omega\left(\overline{c}_k^i\right)\Omega\left(\overline{a}_l^i\right) = \Omega\left(\overline{f}_{kl}^i + \overline{h}_{lk}^i\right),
\end{aligned} \tag{14}$$

переходом от записи в проекциях к векторной записи получим окончательное выражение для ошибки ориентации:

$$\begin{aligned}
\overline{\theta}_i &= \sum_{k=1}^{n}\overline{a}_k^i \Delta q_k + \sum_{k=1}^{n}\overline{c}_k^i \Delta p_k + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\overline{a}_{kl}^i \Delta q_k \Delta q_l +\\
&+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{c}_{kl}^i \Delta p_k \Delta p_l + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\left\{\overline{f}_{kl}^i + \overline{h}_{lk}^i\right\}\Delta p_k \Delta q_l .
\end{aligned} \tag{15}$$

Вывод уравнений для ошибок позиционирования гораздо проще. Складывая $\overline{O_o R_i}$ в ряд Тейлора до членов второго порядка малости, учитывая, что

$$\begin{aligned}
&\partial\overline{O_o R}_i \,/\, \partial q_k = \overline{b}_k^i, \partial\overline{O_o R}_i \,/\, \partial p_k = \overline{d}_k^i,\\
&\partial^2 \overline{O_o R}_i \,/\, \partial q_k \partial q_l = \overline{b}_{kl}^i, \partial^2 \overline{O_o R}_i \,/\, \partial p_k \partial p_l = \overline{d}_{kl}^i,\\
&\partial^2 \overline{O_o R}_i \,/\, \partial p_k \partial q_l = \overline{u}_{kl}^i,
\end{aligned}$$

и принимая во внимание первичные ошибки $\tilde{\Delta}\overline{O_i R_i}$, будем иметь

$$\begin{aligned}
\Delta\overline{O_o P_i} &= \Delta\overline{O_i R_i} + \sum_{k=1}^{n}\overline{b}_k^i \Delta q_k + \sum_{k=1}^{m}\overline{d}_k^i \Delta p_k +\\
&+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\overline{b}_{kl}^i \Delta q_k \Delta q_l + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{d}_{kl}^i \Delta p_k \Delta p_l +\\
&+\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{u}_{kl}^i \Delta p_k \Delta q_l + \sum_{k=1}^{n}\overline{a}_k^i \Delta q_k + \sum_{k=1}^{n}\overline{c}_k^i \Delta p_k \tilde{\Delta}\overline{O_i R}_i .
\end{aligned} \tag{16}$$

Данные формулы могут использоваться для оценки характеристик точности, аттестации и калибровки геометрических параметров, статистического исследования уровня технологических ошибок, а также для решения в приращениях обратной задачи кинематики о положении звеньев механизма. Учет в них членов второго порядка дает эффект, например, при слишком больших длинах звеньев или же в вырожденных конфигурациях, т. е. тогда, когда диапазон изменения первичных ошибок не настолько мал, чтобы в его пределах функции положения и ориентации могли быть с достаточной степенью точности линеаризованы.

Рассмотрим далее автоматизированный способ получения оценок, позволяющих по заданной структуре свободной от связей манипуляционной системы и предельным первичным ошибкам определять границы применимости той или иной (линейной или квадратичной) модели точности. Оценки будем строить на основе анализа нормы остаточного члена в соответствующем тейлоровском разложении.

Для простоты изложения, избегая излишних загромождений текста, исследуем только ошибки отработки обобщенных координат Δq; распространение полученных формул на случай ошибок параметров Δp не составляет принципиальных трудностей.

В рамках линейной модели точности выражения для полных ошибок ориентации и позиционирования записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\overline{\theta}_i &= \sum_{k=1}^{n}\overline{a}_k^i\left(q\right)\Delta q_k + \overline{\chi}_i^1,\\
\Delta\overline{O_0 R_i} &= \sum_{k=1}^{n}\overline{b}_k^i\left(q\right)\Delta q_k + \rho_i^1,
\end{aligned} \tag{17}$$

где остаточные члены

$$\chi_i^1 = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\bar{a}_{kl}^i\left(q+\Lambda\Delta q\right)\Delta q_k\Delta q_l,$$

$$\rho_i^1 = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\bar{b}_{kl}^i\left(q+\Lambda\Delta q\right)\Delta q_k\Delta q_l,$$

$$\Lambda = diag\left\{\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_n\right\},\ 0\le\lambda_i\le 1,\ i=\overline{1,n},$$

$$\left\|\bar{\chi}_i^1\right\| = O\left(\left\|\Delta q\right\|^2\right),\ \left\|\bar{\rho}_i^1\right\| = O\left(\left\|\Delta q\right\|^2\right),\ \left\|\Delta q\right\| = \sqrt{\Delta q^T\Delta q}.$$

Для оценки остаточных членов построим оценки для норм коэффициентов влияния будем иметь [6]

$$\left\|\bar{a}_k^i\right\| = \zeta_{i,v_k}\underline{\underline{\Delta}}\alpha_k^i,$$

$$\left\|\bar{b}_k^i\right\| \le \zeta_{i,v_k}\left(1-\delta_{v_k}\right)+\zeta_{i,v_k}\delta_{v_k}\left\|\overline{O_{v_k}R_i}\right\|. \qquad (18)$$

Обозначим $r_i^*\underline{\underline{\Delta}}\left\|\overline{O_iR_i}\right\|$. Из рекуррентных формул $\overline{O_{v_k}O_i} = \overline{O_{v_k}O_{\pi_i}}+\left(1-\delta_i\right)\varphi_i\bar{e}_i$ следует, что $\left\|O_{v_k}R_i\right\| < r_i^* + \sum_{i\in M_{ik}}\left(1-\delta_j\right)\left|\varphi_j\right|$, где множество индексов $M_{ik} = \left\{j: s_j\in P_{ik}\right\}$, P_{ik} вектор пути из вершины s_i в s_k. Учитывая, что

$$\varphi_i = \eta_i q_{\lambda_i} + \left(1-\eta_i\right)p_{\lambda_i},\ \left|\varphi_i\le\varphi_i^*\right|,$$

где, $\varphi_i^* = \left(1-\eta_i\right)\left|p_{\lambda_i}\right| + \eta_i\max\left\{\left|q_{\lambda_i}^{\min}\right|,\left|q_{\lambda_i}^{\max}\right|\right\}$ получим окончательный вид для коэффициентов первого порядка:

$$\left\|\bar{b}_k^i\right\| \le \beta_k^i = \zeta_{i,v_k}\left\{\left(1-\delta_{v_k}\right)+ +\delta_{v_k}\left(r_i^*\sum_{j\in M_{ik}}\left(1-\delta_j\right)\varphi_j^*\right)\right\}. \qquad (19)$$

Для коэффициентов второго порядка $\bar{b}_{kl}^i$ определим $N_1 = \arg\min_{i=1,k} v_i$, $N_2 = \arg\max_{i=1,k} v_i$. Тогда $\bar{b}_{kl}^i = \bar{a}_{N_1}^i\times\bar{b}_{N_2}^i$, и для любой конфигурации q манипуляционной системы справедлива оценка $\left\|\bar{b}_{kl}^i\right\| \le \beta_{kl}^i = \alpha_{N_1}^i - \beta_{N_2}^i$. Кроме того, $\left\|\bar{a}_{kl}^i\right\| = \alpha_{kl}^i$, где $\alpha_{kl}^i = \alpha_k^i\alpha_l^i$ при $v_k < v_l$ и $\alpha_{kl}^i = 0$ при $v_k \ge v_l$.

Располагая данными оценками и учитывая, что соотношения (17) справедливы для произвольной конфигурации q, запишем:

$$\left\|\bar{\rho}_i^1\right\| \le \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\beta_{kl}^i\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\right|,$$

$$\left\|\bar{\chi}_i^1\right\| \le \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\alpha_{kl}^i\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\right|, \qquad (20)$$

Последнюю оценку можно легко расписать через структурные коэффициенты. Действительно, так как

$$\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\left\|\bar{a}_{kl}^i\right\|\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\right| = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\left\|a_k^i\times a_l^i\right\|\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\right|,$$

$$\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\left\|a_k^i\times a_l^i\right\|\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\right| \le$$

$$\le\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\left\|\bar{a}_k^i\right\|\left\|\bar{a}_l^i\right\|\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\right| - \sum_{k=1}^{n}\left\|\bar{a}_k^i\right\|^2\Delta q_k^2, \qquad (21)$$

то в силу (17) получим

$$\left\|\bar{\chi}_i^1\right\| \le \frac{1}{4}\left\{\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\zeta_{i,v_k}\zeta_{i,v_l}\delta_{v_k}\delta_{v_l}\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\right| - \sum_{k=1}^{n}\zeta_{i,v_k}\delta_{v_k}\Delta q_k^2\right\}. \qquad (22)$$

В рамках квадратичной модели точности выражения для полных ошибок ориентации и позиционирования записываются следующим образом:

$$\bar{\theta}_i = \sum_{k=1}^{n}\bar{a}_k^i\Delta q_k + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\bar{a}_{kl}^i\Delta q_k\Delta q_l + \chi_i^2, \qquad (23)$$

$$\Delta\overline{O_0R_i} = \sum_{k=1}^{n}\bar{b}_k^i\Delta q_k + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\bar{b}_{kl}^i\Delta q_k\Delta q_l + \rho_i^2,$$

где остаточные члены

$$\chi_i^2 = \frac{1}{6}\sum_{l=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{s=1}^{n}\bar{a}_{kls}^i\left(q+\Lambda\Delta q\right)\Delta q_k\Delta q_l\Delta q_s,$$

$$\rho_i^2 = \frac{1}{6}\sum_{l=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{s=1}^{n}b_{kls}^i\left(q+\Lambda\Delta q\right)\Delta q_k\Delta q_l\Delta q_s,$$

$$\left\|\bar{\chi}_i^2\right\| = O\left(\left\|\Delta q\right\|^3\right),\ \left\|\bar{\rho}_i^2\right\| = O\left(\left\|\Delta q\right\|^3\right).$$

Векторные коэффициенты влияния третьего порядка $\bar{b}_{kls}^i$ можно определить следующим образом:

$$\bar{b}_{kls}^i = \bar{a}_{N_1}^i\times\left(\bar{a}_{N_2}^i\times\bar{b}_{N_3}^i\right),$$

$$N_1 = \arg\min_{i=1,k,s} v_i,\ N_2 = \arg\ mid_{i=1,k,s}\ v_i.\ N_3 = \arg\max_{i=1,k,s} v_i,$$

$mid\left(a,b,c\right)$ есть среднее из трех чисел.

Найдем далее по (10) скалярные коэффициенты $\beta_{kls}^i = \alpha_{N_1}^i\alpha_{N_2}^i\beta_{N_3}^i$ и $\alpha_{kls}^i = 0$ при $\left(v_l\ge v_s\right)\vee\left(v_l < v_s\le v_k\right)$, $\alpha_{kls}^i = \zeta_{i,v_l}\zeta_{i,v_k}\zeta_{i,v_s}\delta_{v_l}\delta_{v_k}\delta_{v_s}$ - в противном случае. Учитывая, что для произвольной конфигурации q справедливо $\left\|\bar{b}_{kls}^i\right\|\le\beta_{kls}^i$ и $\left\|\bar{a}_{kls}^i\right\|\le\alpha_{kls}^i$, получим

$$\left\|\bar{\rho}_i^2\right\| \le \frac{1}{6}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\sum_{s=1}^{n}\beta_{kls}^i\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\left\|\Delta q_s\right|,$$

$$\left\|\bar{\chi}_i^2\right\| \le \frac{1}{6}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\sum_{s=1}^{n}\alpha_{kls}^i\left|\Delta q_k\right\|\Delta q_l\left\|\Delta q_s\right|.$$

Аналогичным способом можно не только построить оценки норм остаточных членов, но и непосредственные оценки норм ошибок позиционирования и ориентации. На основании теоремы Лагранжа, распространенной на многомерный случай, будем иметь

$$\overline{\theta}_i = \sum_{k=1}^{n} a_k^i \left(q + \Lambda\Delta\theta\right)\Delta q_k,$$

$$\Delta\overline{O_0 R_i}_{\,i} = \sum_{k=1}^{n} b_k^i \left(q + \Lambda\Delta\theta\right)\Delta q_k. \qquad (24)$$

Тогда, как следует из оценок норм коэффициентов первого порядка, для произвольной конфигурации q манипуляционной системы

$$\left\|\overline{\theta}_i\right\| \le \sum_{k=1}^{n} \alpha_k^i \left|\Delta q_k\right|, \ \left\|\Delta\overline{O_0 R_i}\right\| \le \sum_{k=1}^{n} \beta_k^i \left|\Delta q_k\right|. \quad (25)$$

Возьмем в качестве примера манипулятор с n вращательными кинематическими парами и n ненулевыми звеньями, формализованная схема замещения которого показана на рис.2.

В данном случае

$\varphi_{2i} = q_i$, $\varphi_{2i} = l_i$, $\eta_{2i-1} = 1$, $\eta_{2i} = 0$, $\delta_{2i} = 1$, $\lambda_{2i-1} = i$, $\lambda_{2i} = i$, $v = \left(1,3,5,\ldots,2n-1\right)^T$, $\mu = \left(2,4,\ldots,n\right)^T$,

матрица путей ζ, — нижняя треугольная матрица с единичными элементами. Рассматривается точность позиционирования и ориентации схвата манипулятора, ющенного в точку O_{2n}. Учитывая, что в данном примере $\overline{a}_k = \overline{e}_{2k-1}$, $\overline{b}_k = \overline{e}_{2k-1} \times \overline{O_{2k-1} O_{2n}}$, получим следующую оценку для коэффициентов первого порядка:

$$\left\|\overline{b}_k\right\| \le \beta_k = \sum_{i=k}^{n} l_i, \ k = \overline{1,n}.$$

Пусть приводы всех кинематических пар одинакового типа такие, что $\max\limits_{i=\overline{1,n}} \left|\Delta q_i\right| = \Delta$.

Тогда, расписывая для данной структуры выражения (23), получим $\left\|\overline{\rho}^1\right\| \le \Delta^2 S''/2$, где $S'' = \sum_{k=1}^{n} \left(2k-1\right)\beta_k$.

Учитывая, что $\sum_{k=1}^{n} \beta_k = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=k}^{n} l_i = \sum_{k=1}^{n} k l_k$ и, что $\sum_{k=1}^{n} k\beta_k = \sum_{k=1}^{n} k \times (k+1) l_k / 2$, получим окончательный вид оценок

$$\left\|\overline{\rho}^1\right\| \le \Delta^2 \left(\sum_{k=1}^{n} k^2 l_k\right) \Big/ 2, \ \left\|\overline{\chi}^1\right\| \le \Delta^2 n\left(n-1\right)/4. \quad (26)$$

Далее, расписывая для данной структуры выражения (24) будем иметь $\left\|\overline{\rho}^1\right\| \le \Delta^3 S'''/6$, где, как нетрудно показать непосредственными вычислениями, $S''' = \sum_{k=1}^{n} \{\left(2k-1\right)\left(k-1\right) + k^2\}\beta_k$.

Учитывая, что

$$\sum_{k=1}^{n} k^2 \beta_k = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=k}^{n} k^2 l_k = \sum_{k=1}^{n} k\left(k+1\right)\left(2k+1\right) l_k / 6,$$

после несложных преобразований запишем окончательный вид оценок:

$$\left\|\overline{\rho}^2\right\| \le \Delta^3 \left(\sum_{k=1}^{n} k^3 l_k\right) \Big/ 6, \qquad (27)$$

$$\left\|\overline{\chi} 2\right\| \le \Delta^3 n\left(n-1\right)\left(2m-1\right)/36.$$

Кроме того, из (25) нетрудно получить

$$\left\|\overline{\theta}_{2n}\right\| \le \Delta n, \ \left\|\overline{O_0 O_{2n}}\right\| \le \Delta \sum_{k=1}^{n} \beta_k = \Delta\left(\sum_{k=1}^{n} k l_k\right).$$

(28)

Введенные оценки не зависят от конфигурации манипуляционной системы и определяются лишь ее структурой и размерами предельных первичных ошибок. Таким образом, они являются интегральными характеристиками, использование которых особенно важна на ранних стадиях проектирования манипулятора. Сам процесс вычисления структурных коэффициентов α и β по заданной кинематической схеме достаточно просто алгоритмизируется и не требует значительных ресурсов памяти и времени ЭВМ.

При алгоритмизации ряда задач, таких как линеаризация уравнений движения в окрестности программной траектории, расчет стандартных режимов и анализ свободных колебаний, построение модели чувствительности для идентификации параметров и т. д., требуется предварительно провести линеаризацию кинематических уравнений. Опреде-

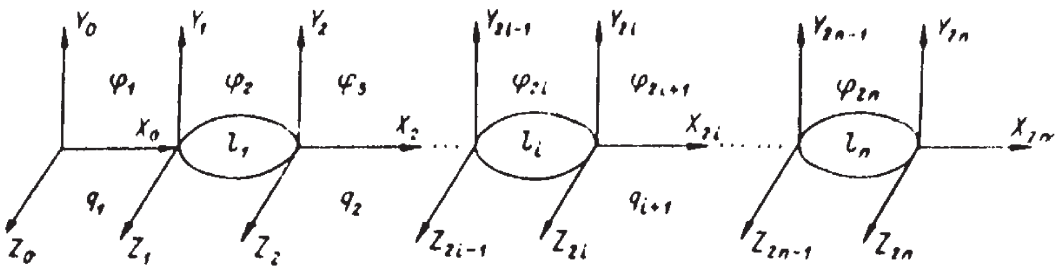


Рис. 2. Механическая цепь с вращательными парами V класса.

лим с этой целью ошибки скоростей и ускорений систем координат, обусловленпые первичными ошибками обобщенных координат скоростей и ускорений, а также геометрических параметров цепи.

Как и прежде, будем оперировать с деревом систем координат, свободной от связей системы, предполагая заданным в некоторой системе координат s_m постоянный вектор $\overline{O_m R_m}$ и относя его к первичным ошибкам $\tilde{\Delta}\overline{O_m R_m}$.

Вычисляя на каждом шаге рекуррентных соотношений: абсолютные дифференциалы кинематических характеристик учтем, что при прямом проходе система координат s_{π_i} условно неподвижна, s_i - относительное движение, а при обратном проходе система координат s_{π_i} условно принимается за неподвижную, система координат s_i совершает переносное движение, s_{π_i} - относительное движение. В результате применения правил дифференцирования векторов, связанных с подвижными системами координат, получим после преобразований рекуррентные формулы

$$\Delta\overline{\omega}_i = \Delta\overline{\omega}_{\pi_i} + \delta_i \Delta\dot{\varphi}\overline{e}_i + \delta_i \overline{\theta}_{\pi_i} \times \dot{\varphi}_i \overline{e}_i,\ \delta\overline{\omega}_0 = 0,$$

$$\Delta\overline{V}_{O_i} = \Delta\overline{V}_{O_{\pi i}} + (1-\delta_i)\Big\{\Delta\dot{\varphi}_i \overline{e}_i + \big(\Delta\omega_{\pi i}\varphi_i + \overline{\omega}_{\pi i}\Delta\varphi_i + \overline{\theta}_{\pi i}\varphi_i\big)\times \overline{e}_i + \overline{\omega}_{\pi i}\times\big(\overline{\theta}_{\pi i}\times\varphi_i\overline{e}_i\big)\Big\},$$

$$\Delta\overline{V}_{Ri} = \Delta\overline{V}_{Oi} + \Delta\overline{\omega}_i \times \overline{O_i R_i} + \overline{\omega}_i \times \big(\overline{\theta}_i \times \overline{O_i R_i}\big) + \overline{\omega}_i \times \tilde{\Delta}\overline{O_i R_i},\ \Delta\overline{V}_0 = 0,$$

$$\Delta\overline{\varepsilon}_i = \Delta\overline{\varepsilon}_{\pi i} + \delta_i\Big\{\overline{\omega}_{\pi i}\times\big(\overline{\theta}_{\pi i}\times\dot{\varphi}_i\overline{e}_i\big) + \big(\overline{\theta}_{\pi i}\ddot{\varphi}_i + \Delta\overline{\omega}_{\pi i}\dot{\varphi}_i + \overline{\omega}_{\pi i}\Delta\dot{\varphi}_i\big)\times\overline{e}_i + \Delta\ddot{\varphi}_i\overline{e}_i\Big\},\ \Delta\overline{\varepsilon}_0 = 0, \quad (29)$$

$$\Delta\overline{W}_{Oi} = \Delta\overline{W}_{O_{\pi i}} + (1-\delta_i)\Big\{\overline{\omega}_{\pi i}\times\big[\overline{\omega}_{\pi i}\times\big(\overline{\theta}_{\pi i}\times\varphi_i\overline{e}_i\big)\big] + \big(\Delta\overline{\varepsilon}_{\pi i}\varphi_i + \overline{\varepsilon}_{\pi i}\Delta\varphi_i + 2\Delta\overline{\omega}_{\pi i}\dot{\varphi}_i + 2\overline{\omega}_{\pi i}\Delta\dot{\varphi}_i + \overline{\theta}_{\pi i}\ddot{\varphi}_i\big)\times\overline{e}_i + \big(\overline{\varepsilon}_{\pi i}\varphi_i + 2\overline{\omega}_{\pi i}\dot{\varphi}_i\big)\times\big(\overline{\theta}_{\pi i}\times\overline{e}_i\big) + \big(\Delta\overline{\omega}_{\pi i}\varphi_i + \overline{\omega}_{\pi i}\Delta\varphi_i\big)\times\big(\omega_{\pi i}\times e_i\big) + \omega_{\pi i}\times\big(\Delta\omega_{\pi i}\times\varphi_i e_i\big) + \Delta\ddot{\varphi}_i e_i\Big\},$$

$$\Delta\overline{W}_{Ri} = \Delta\overline{W}_{Oi} + \Delta\overline{\varepsilon}_i\times\overline{O_i R_i} + \overline{\varepsilon}_i\times\big(\overline{\theta}_i\times\overline{O_i R_i}\big) + \Delta\overline{\omega}_i\times\big(\overline{\omega}_i\times\overline{O_i R_i}\big) + \overline{\omega}_i\times\big(\Delta\overline{\omega}_i\times\overline{O_i R_i}\big) + \overline{\omega}_i\times\big[\Delta\overline{\omega}_i\times\big(\overline{\theta}_i\times\overline{O_i R_i}\big)\big] + \overline{\varepsilon}_i\times\tilde{\Delta}\overline{O_i R_i} + \overline{\omega}_i\times\big(\overline{\omega}_i\times\tilde{\Delta}\overline{O_i R_i}\big),$$

$$\Delta\overline{W}_0 = 0,$$

для прямого (вдоль пути от s_0 к s_m) прохода и

$$\Delta\{{}^{\pi i}\omega_m\} = \Delta\{{}^{i}\omega_m\} + \delta_i\Delta\dot{\varphi}_i e_i + \delta_i\Delta\varphi_i e_i \times {}^{i}\omega_m,$$

$$\Delta^m\omega_m = 0,$$

$$\Delta\{{}^{\pi i}\overline{V}_{Rm}\} = \Delta\{{}^{i}\overline{V}_{Rm}\} + (1-\delta_i)\Delta\dot{\varphi}_i\overline{e}_i + \delta_i\{\Delta\dot{\varphi}_i\overline{e}_i \times \overline{O_i R_m} + \dot{\varphi}_i\Delta\varphi_i\overline{e}_i\times\big(\overline{e}_i\times\overline{O_i R_m}\big) + \dot{\varphi}_i\overline{e}_i\times\Delta\{\overline{O_i R_i}\} + \Delta\varphi_i\overline{e}_i\times{}^{i}\overline{V}_{Rm}\},\ \Delta^m\overline{V}_{R_m} = 0,$$

$$\Delta\{{}^{\pi_i}\overline{\varepsilon}_m\} = \Delta\{{}^{i}\varepsilon_m\} + \delta_i\{\Delta\ddot{\varphi}_i\overline{e}_i + \Delta\varphi_i\overline{e}_i\times{}^{i}\overline{\varepsilon}_m + \Delta\dot{\varphi}_i\overline{e}_i\times{}^{i}\overline{\omega}_m + \dot{\varphi}_i\overline{e}_i\times\Delta\{{}^{i}\overline{\omega}_m\} + \dot{\varphi}_i\Delta\varphi_i\overline{e}_i\times\big(\overline{e}_i\times{}^{i}\overline{\omega}_m\big)\},$$

$$\Delta\{{}^{m}\overline{\varepsilon}_m\} = 0,$$

$$\Delta\{{}^{\pi_i}\overline{W}_{Rm}\} = \Delta\{{}^{i}\overline{W}_{Rm}\} + (1-\delta_i)\Delta\ddot{\varphi}_i\overline{e}_i + \delta_i\Big\{\big(\Delta\ddot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_i^2\Delta\varphi_i\big)\times\big(\overline{e}_i\times\overline{O_i R_m}\big) + \ddot{\varphi}_i\overline{e}_i\times\Delta\overline{O_i R}_m + \big(\ddot{\varphi}_i\Delta\dot{\varphi}_i\big)\Big[\overline{e}_i\times\big(\overline{e}_i + \overline{O_i R}_m\big)\Big] + \dot{\varphi}_i^2\overline{e}_i\times\big(e_i\times\Delta\overline{O_i R}_m\big) + \Delta\varphi_i\overline{e}_i\times{}^{i}\overline{W}_{Rm} + 2\Delta\dot{\varphi}_i\overline{e}_i\times{}^{i}V_{Rm} + 2\dot{\varphi}_i\overline{e}_i\times\Delta^{i}\overline{V}_{Rm} + 2\dot{\varphi}_i\Delta\varphi_i\overline{e}_i\times\big(\overline{e}_i\times{}^{i}\overline{V}_{Rm}\big),\quad (30)$$

для обратного (вдоль пути от s_m к $s_{\pi m}$ и т. д. к s_o) прохода.

Здесь

$$\Delta\dot{\varphi}_i = \eta_i\Delta\dot{q}_{\lambda i};\ \Delta\ddot{\varphi}_i = \eta_i\Delta\ddot{q}_{\lambda i};$$

$$\Delta\varphi_i = \eta_i\Delta q_{\lambda i} + (1-\eta_i)\Delta p_{\lambda i};\ \overline{\theta}_i,\ \Delta\overline{O_i R_m}$$

линейные составляющие выражений (15), (16).

При реализации вычислительных алгоритмов проецированием (29) на оси системы координат s_o или же (30) на оси системы координат $s_{\pi i}$ получим рекуррентные формулы для определения ошибок скоростей и ускорений в осях базовой системы координат. Проецируя (29) на оси системы координат s_i или же (30) на оси системы координат s_m, найдем формулы для тех же величин в осях связанной системы координат s_m. Таким образом, имеем четыре типа, удобных для программирования рекуррентных соотношений.

Вычисляя далее абсолютные дифференциалы выражений с учетом свойств коэффициентов влияния первого и второго порядков, применением правил дифференцирования векторов, связанных с подвижными системами координат, получим выражения, характеризующие ошибки скоростей и ускорений как линейные формы ошибок обобщенных координат, скоростей, ускорений, а также геометрических параметров цепи [6]:

$$\Delta\omega_i = \sum_{k=1}^{n} \bar{a}_k^i \Delta\dot{q}_k + \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} \bar{a}_{kl}^i \dot{q}_l \Delta q_k + \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} \bar{f}_{kl}^i \dot{q}_l \Delta p_k,$$

$$\Delta\bar{V}_i = \sum_{k=1}^{n} \bar{b}_k^i \Delta\dot{q}_k + \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} \bar{b}_{kl}^i \dot{q}_l \Delta q_k + \sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n} \bar{u}_{kl}^i \dot{q}_l \Delta p_k, +$$

$$+\omega_i \times \Delta\overline{O_i R_i},$$

$$\Delta\bar{\varepsilon}_i = \sum_{k=1}^{n} \bar{a}_k^i \Delta\ddot{q}_k + \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} \left(\bar{a}_{kl}^i + \bar{a}_{lk}^i\right)\dot{q}_l \Delta\dot{q}_k +$$

$$+\sum_{k=1}^{n}\left\{\sum_{l=1}^{n} \bar{a}_{kl}^i \ddot{q}_l + \sum_{l=1}^{n}\sum_{s=1}^{n} \bar{a}_{kls}^i \dot{q}_l \dot{q}_s\right\}\Delta q_k + \qquad (31)$$

$$+\sum_{k=1}^{m}\left\{\sum_{l=1}^{n} \bar{f}_{kl}^i \ddot{q}_l + \sum_{l=1}^{n}\sum_{s=1}^{n} \bar{f}_{kls}^i \dot{q}_l \dot{q}_s\right\}\Delta p_k,$$

$$\Delta\overline{W}_i = \sum_{k=1}^{n} \bar{b}_k^i \Delta\ddot{q}_k + 2\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} \bar{b}_{kl}^i \dot{q}_l \Delta q_k +$$

$$+\sum_{k=1}^{n}\left\{\sum_{l=1}^{n} \bar{b}_{kl}^i \ddot{q}_l + \sum_{l=1}^{n}\sum_{s=1}^{n} \bar{b}_{kls}^i \dot{q}_l \dot{q}_s\right\}\Delta q_k +$$

$$+\bar{\varepsilon}_i \times \tilde{\Delta}\overline{O_i R_i} + \omega_i \times \left(\omega_i \times \tilde{\Delta}\overline{O_i R_i}\right) +$$

$$+\sum_{k=1}^{m}\left\{\sum_{l=1}^{n} \bar{u}_{kl}^i \ddot{q}_l + \sum_{l=1}^{n}\sum_{s=1}^{n} \bar{u}_{kls}^i \dot{q}_l \dot{q}_s\right\}\Delta p_k.$$

Альтернативная форма записи $\Delta\bar{\omega}_i$, $\Delta\bar{V}_i$, $\Delta\bar{\varepsilon}_i$, $\Delta\overline{W}_i$ помимо введенных ранее матричных аналогов скоростей A_i B_i, предусматривает использование функциональных матриц $\frac{\partial\bar{V}_i}{\partial q}, \frac{\partial\overline{W}_i}{\partial q}, \frac{\partial\bar{V}_i}{\partial\dot{q}} \in R^{3\times n}$ и $\frac{\partial\bar{\omega}_i}{\partial q}, \frac{\partial\bar{\varepsilon}_i}{\partial q}, \frac{\partial\bar{V}_i}{\partial p}, \frac{\partial\overline{W}_i}{\partial p} \in R^{3\times m}$, столбцы которых определяются по (31) и являются комбинациями векторных коэффициентов влияния, образующими соответствующие формы обобщенных скоростей и ускорений.

Введенные в (31) векторные коэффициенты влияния третьего порядка

$$\bar{a}_{kls}^i \triangleq \frac{\partial\bar{a}_{ls}^i}{\partial q_k},\ \bar{f}_{kls}^i \triangleq \frac{\partial\bar{a}_{ls}^i}{\partial p_k},\ \bar{b}_{kls}^i \triangleq \frac{\partial\bar{b}_{ls}^i}{\partial q_k},\ \bar{u}_{kls}^i \triangleq \frac{\partial\bar{b}_{ls}^i}{\partial p_k},$$

вычисляются с помощью коэффициентов влияния первого и второго порядков следующим образом:

$$\bar{a}_{kls}^i = \begin{cases} 0, & (v_l \ge v_s) \vee (v_l \le v_s \le v_k), \\ \bar{a}_l^i \times \bar{a}_{ks}^i = \bar{a}_l^i \times \left(\bar{a}_k^i \times \bar{a}_s^i\right), & v_l \le v_k \le v_s, \\ \bar{a}_k^i \times \bar{a}_{ls}^i = \bar{a}_k^i \times \left(\bar{a}_l^i \times \bar{a}_s^i\right), & v_k \le v_l \le v_s, \end{cases}$$

$$\bar{f}_{kls}^i = \begin{cases} 0, & (v_l \ge v_s) \vee (v_l \le v_s \le \mu_k), \\ \bar{a}_l^i \times \bar{f}_{ks}^i = \bar{a}_l^i \times \left(\bar{c}_k^i \times \bar{a}_s^i\right), & v_l \le \mu_k \le v_s, \\ \bar{c}_k^i \times \bar{a}_{ls}^i = \bar{c}_k^i \times \left(\bar{a}_l^i \times \bar{a}_s^i\right), & \mu_k \le v_l \le v_s, \end{cases} \qquad (32)$$

$$\bar{b}_{kls}^i = \begin{cases} \bar{a}_{kl}^i \times \bar{b}_s^i + \bar{a}_l^i \times \bar{b}_{ks}^i, & v_l \le v_s, \\ \bar{a}_{ks}^i \times \bar{b}_l^i + \bar{a}_s^i \times \bar{b}_{kl}^i, & v_l \ge v_s, \end{cases}$$

$$\bar{u}_{kls}^i = \begin{cases} \bar{f}_{kl}^i \times \bar{b}_s^i + \bar{a}_l^i \times \bar{u}_{ks}^i, & v_l \le v_s, \\ \bar{f}_{ks}^i \times \bar{b}_l^i + \bar{a}_s^i \times \bar{u}_{kl}^i, & v_l \ge v_s. \end{cases}$$

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бруевич И.Г. Точность механизмов. - М.: ГИИТЛ, 1946. - 342 с.
2. Овакимов А.Г. Аналог скоростей и ускорений пространственных механизмов с несколькими степенями свободы // Машиностроение. - 1969. - №6. - С. 51-58.
3. Лурье А.И. Аналитическая механика. Гос. изд-во физ.-мат. литературы. Москва: 1961. - 823 с.
4. Кирпичников С.И., Новоселов В.С. Математические аспекты кинематики твердого тела. - Л. Изд-во ЛГУ. - 1986. - 252с.
5. Виттебург И. Динамика систем твердых тел. - М. Мир. 1980. - 224 с.
6. Елисеев С.В. Построение математических моделей многозвенных шарнирных цепей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - №3(7). Иркутск. ИрГУПС. - 2005. - С. 6-13.

Кузнецов Н. К., Перелыгина А. Ю.

УДК 621.01:534

УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ ТРЕХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ

Автоматизация современного производства приводит к появлению новых высокопроизводительных машин с программным управлением: промышленные роботы и манипуляторы, агрегатные станки и обрабатывающие центры, подъёмные машины, транспортирующие, ориентирующие и загрузочные устройства, координатные и поворотные столы и т.д. В отличие от цикловых машин, предназначенных для реализации явно выраженного установившегося движения, управляемые машины позволяют осуществлять механическое движение любой сложности, в том числе и управляемые переходные режимы. Высокие требования по быстродействию и точности, предъявляемые к этим машинам, вызывают необходимость учета податливости исполнительных механизмов в системах управления движением и разработки методов и средств ограничения упругих колебаний. Эффективным путем решения этой проблемы является использование активного способа компенсации колебаний. Принцип активного гашения упругих колебаний заключается в формировании с помощью внешних источников энергии дополнительных периодических воздействий, возбуждающих колебания той же частоты, но противоположной фазы. В известных работах [1,2], посвященных проблеме управления упругими колебаниями, как правило, используется двухмассовая расчетная схема, с помощью которой моделируется движение по отдельным степеням подвижности исполнительных механизмов. В то же время, как показывают результаты экспериментальных исследований упругих свойств промышленных роботов [3,4], колебательные движения по некоторым степеням подвижности исполнительных механизмов более точно могут быть описаны трехмассовой колебательной системой. Например, движение поворота для промышленного робота, работающего в цилиндрических, сферических и угловых системах координат — из-за наличия поворотной колонны или стойки, обладающей существенной инерционностью (УМ-1, «Универсал-5», РМ-01). У промышленных роботов, имеющих двигатели, расположенные на основании, например, у робота ТУР-10 из-за протяженной механической передачи движение звеньев можно представить в виде системы «привод—редуктор—звено». Данная расчетная схема также применима при наличии в исполнительном механизме манипулятора люфтов, редукторов с большим передаточным отношением и т.д. В настоящей статье приводятся результаты исследований задач активного гашения колебаний применительно к трехмассовой расчетной схеме.

Для трехмассовой колебательной системы существует ряд особенностей, которые необходимо учитывать при разработке систем управления колебаниями. Во-первых, в отличие от двухмассовой системы, возможно формирование управляющего воздействия, как на первую массу системы, так и на промежуточное звено. Во-вторых, дополнительные обратные связи могут быть организованы не только по упругим отклонениям исполнительного механизма, но и по отклонениям передаточного механизма. Кроме того, учет промежуточной массы затрудняет возможности динамического анализа и синтеза систем управления колебаниями из-за высокого порядка дифференциальных уравнений движения. Последнее обстоятельство требует введения в расчеты обоснованных ограничений и упрощений.

Расчетная схема трехмассовой колебательной системы, построенная на основе обобщенной расчетной схемы [1], показана на рис. 1. Здесь приняты следующие обозначения: q. координата, характеризующая движение привода; Δq_1,Δq_2 упругие смещения масс; m_1, m_2 соответственно приведенные массы привода и элементов преобразования движения; m - приведенные массы упругого звена, схвата и груза; Q_n — приведенная движущая

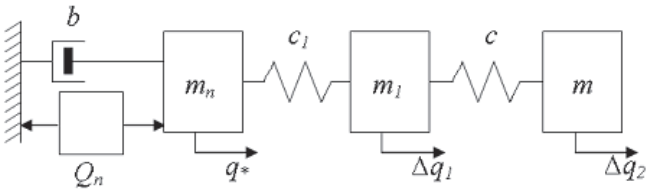


Рис. 1. Трехмассовая расчетная схема колебательной системы.

сила привода; c_1 — приведенный коэффициент жесткости элементов преобразования движения; c — приведенный коэффициент жесткости несущего схвата; b — коэффициент вязкого трения.

Дифференциальные уравнения движения трехмассовой системы для режима позиционирования в окрестности некоторого заданного положения, определяемого координатой, имеют вид

$$m_n\ddot{q}_+ + b\dot{q}_+ - c_1\Delta q_1 = Q_n, \quad (1)$$

$$m_1\Delta\ddot{q}_1 + c_1\Delta q_1 = -m_1\ddot{q}_+ + c\Delta q_2, \quad (2)$$

$$m\Delta\ddot{q}_2 + c\Delta q_2 = -m\ddot{q}_+ - m\Delta\ddot{q}_1. \quad (3)$$

Рассмотрим упругие колебания, возникающие в системе при воздействии на нее постоянной силы Q_n. Структурная схема, полученная на основании преобразованных по Лапласу уравнений (1) - (3) при разомкнутой системе управления основным движением, приведена на рис.2.

На основе структурной схемы было проведено численное моделирование процессов управления движением трехмассовой колебательной системы. Исследования выполнялись в среде MATLAB с использованием системы визуального моделирования Simulink с помощью блок-диаграммы, показанной на рис. 3. Эта модель получена на основе структурной схемы, изображенной на рис. 2. Моделирование проводилось при следующих значениях параметров системы: $m_n = 10$кг; $m_1 = 25$кг; $m = 40$кг; $b = 15$ НМс/м. На вход модели подавалось воздействие в виде ступенчатого сигнала $Q_n = Q_0 1(t)$. На выходе модели формировался сигнал, соответствующий суммарным упругим колебаниям робота $\Delta q = \Delta q_1 + \Delta q_2$. Результаты моделирования можно просмотреть путем раскрытия индикатора (Scope) на основной блок-диаграмме.

В процессе исследований было установлено, что характер переходного процесса системы определяется как соотношениями между приведенными коэффициентами жесткости, так и приведенными массами. В качестве примера, на рис. 4 для заданных параметров системы приведены графики свободных колебаний исполнительного механизма при различных коэффициентах жесткости. В первом случае, приведенный коэффициент жесткости элементов преобразования движения c_1 принят *больше,* чем коэффициент жесткости несущего схвата c ($c_1 = 1{,}5 \cdot 10^4$ Н/м; $c = 0{,}8 \cdot 10^4$ Н/м) (рис. 4*а*); во втором случае, (рис. 4*б*) — наоборот ($c_1 = 0{,}8 \cdot 10^4$ Н/м; $c = 1{,}5 \cdot 10^4$ Н/м). Из графиков следует, что во втором случае интенсивность затухания колебаний выше, чем в первом.

На рис. 5 показаны графики свободных колебаний при различных соотношениях между массами, определяемых коэффициентом $n = m_n / M$, где $M = m_n + m_1 + m$ - полная масса системы. График на рис 5,*а* соответствует $n = 0{,}53$, а на рис. 5,*б* -$n = 0{,}13$. Как видно из этих графиков, увеличение n (массы привода) приводит к снижению интенсивности затуха-

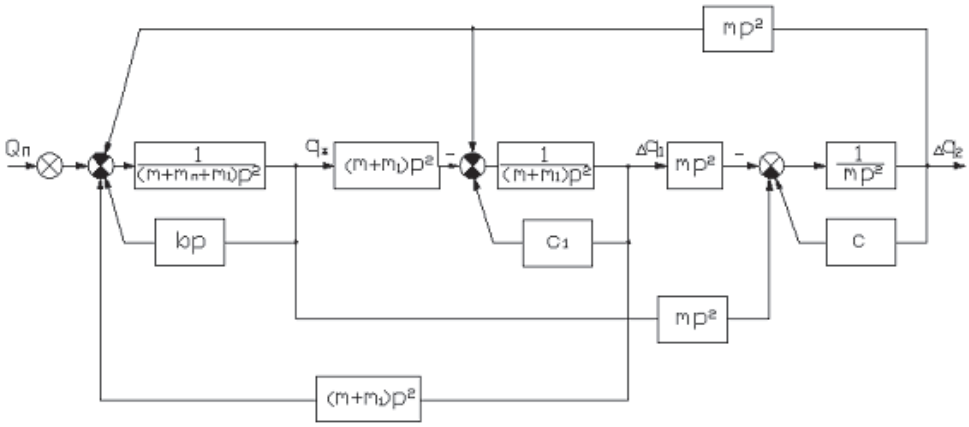


Рис.2. Структурная схема трехмассовой системы.

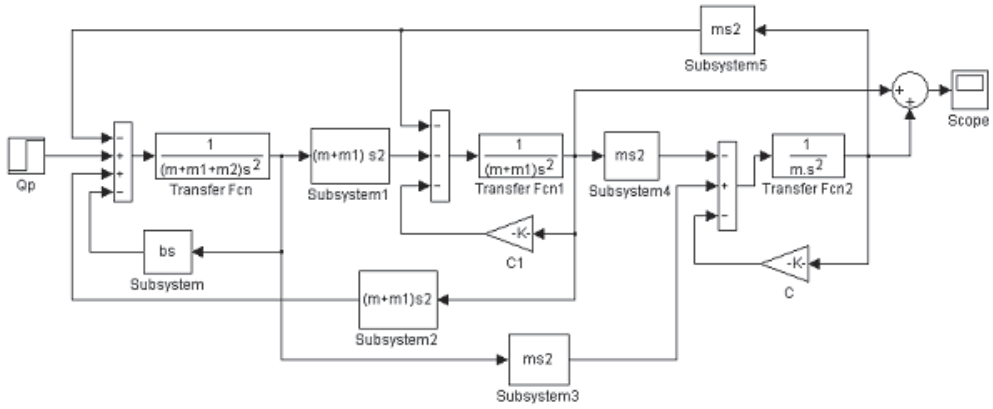
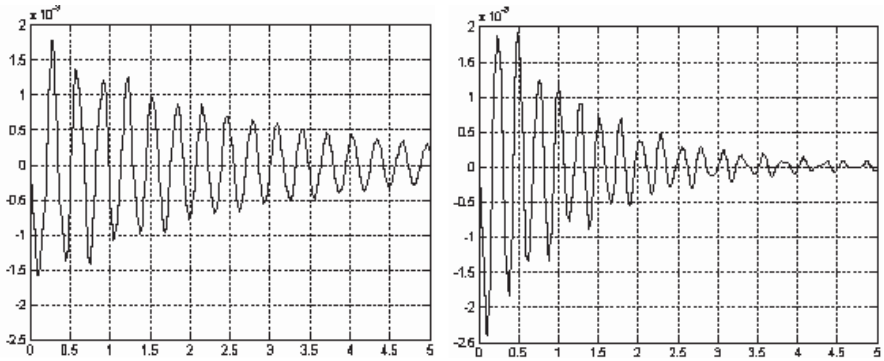
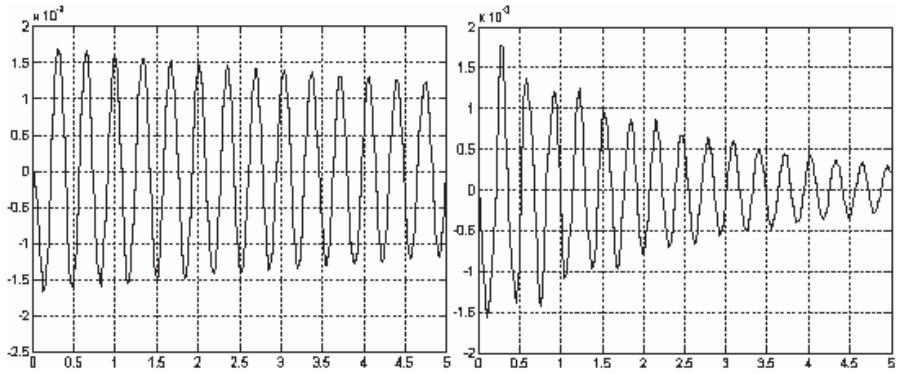


Рис.3. Simulink-модель трехмассовой системы.



а) $c_1 > c$ (c_1=1,5·10^4 Н/м; c=0,8·10^4 Н/м) **б) $c_1 < c$ (c_1=0,8·10^4 Н/м; c=1,5·10^4 Н/м)**

Рис.4. Упругие колебания трехмассовой системы при различном соотношении приведенных коэффициентов жесткости.



а) n = **0,53(**m_n**=40кг;** m_l**=25кг;** m**=10кг)** **б)** n = **0,13 (**m_n**=10кг;** m_l**=25кг;** m**=40кг)**

Рис.5. Упругие колебания трехмассовой системы при различных соотношениях масс.

ния колебаний, наоборот, уменьшение n способствует повышению интенсивности гашения колебаний системы.

Физически это объясняется относительным увеличением при малом n, когда $(m+m_l)>>m_n$, скорости колебаний привода, за счет чего увеличивается поглощение энергии колебаний вязким трением движущих частей привода. Таким образом, наиболее неблагоприятным следует считать такое соотношение масс, когда $(m+m_l)<<m_n$. Исследуем эффективность активной компенсации упругих колебаний исполнительного механизма для этого случая. Блок-диаграмма трехмассовой системы с дополнительными обратными связями показана на рис.6.

Как следует из этой схемы, возможны два варианта введения дополнительных силовых обратных связей в систему. В первом случае, дополнительная обратная связь с передаточной функцией $W'_{gon}(p)$ охватывает и привод, и механическую передачу; во втором же случае, дополнительная связь с передаточной функцией $W''_{gon}(p)$ охватывает только механическую передачу. И если в первом случае допол-

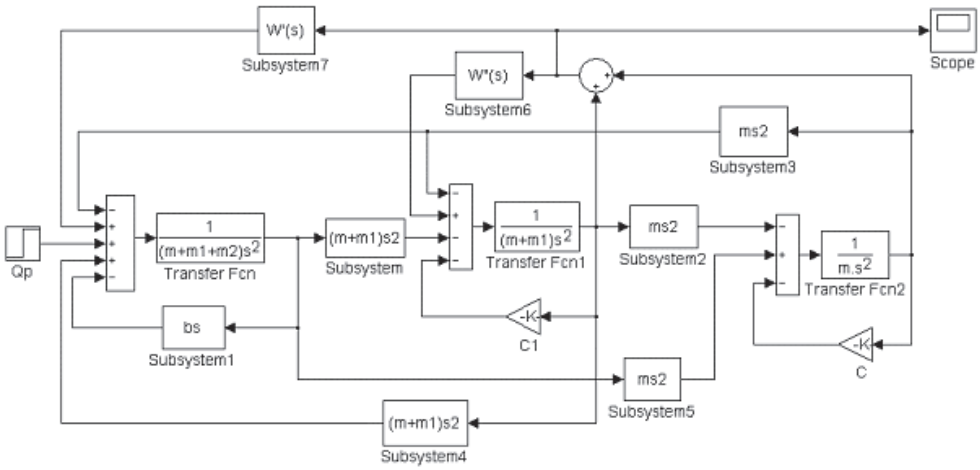


Рис.6. Simulink-модель трехмассовой системы с дополнительными связями.

нительная силовая обратная связь может быть реализована с помощью приводов программных движений управляемой машины, то во втором случае для реализации этой связи необходима установка дополнительных приводов, обеспечивающих необходимые воздействия на промежуточную массу m_1. Расчетная схема во втором случае будет совпадать с двухмассовой расчетной схемой, рассмотренной ранее [1]. Учитывая это, исследуем лишь первый вариант введения дополнительных силовых обратных связей.

По структурной схеме, приведенной на рис. 2, находим передаточную функцию, связывающую абсолютные колебания массы m с движущей силой Q_n при отсутствии дополнительной связи

$$W_0(p) = -\frac{b_1 p^3 + b_3 p}{a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5},$$

$$\Delta q_0 = \Delta q_{10} + \Delta q_{20} = W_0(p) Q_n, \qquad (4)$$

где $b_1 = m m_1, b_3 = (m + m_1)c + m c_1; a_0 = m m_n m_1;$ $a_1 m m_1 b; a_2 = m_n\left[(m + m_1)c + m c_1\right] + m m_1 c_1;$

$a_3 = b\left[(m + m_1)c + m c_1\right]; a_4 = c c_1 b; p = d/dt.$

Задавая входное воздействие в виде ступенчатого сигнала и используя табулированные зависимости квадратичных функционалов от коэффициентов дробно-рациональных функций [5], на основе (4) получим интегральный функционал исходной системы

$$J_0 = \frac{Q_n (c + c_1)}{2 c c_1 b m_n}. \qquad (5)$$

Упругие колебания массы m при этом определяются выражением

$$\Delta q = W(p) Q_n, \qquad (6)$$

где $W(p) = W_0(p) / \left(1 + W_0(p) W_{gon}(p)\right);$

$\Delta q = \Delta q_1 + \Delta q_2$.

Согласно [5] для пропорциональной дополнительной обратной связи с передаточной функцией $W_{gon}(p) = \pm k_D$ на основе уравнения (6) интегральный функционал имеет вид

$$J_1 = \frac{Q_n\left[\pm m_1 c k_D + F\right]}{2 b m_n\left[m c c_1^2 - k_D\left(\pm m_1 c c_1 \pm F + c \cdot m_1 \cdot k_D\right)\right]}, \qquad (7)$$

где $F = m c_1 (c + c_1)$.

Условие эффективности этой связи с учетом выражений (5) и (7) примет вид

$$k_{10} = \frac{J_1}{J_0} = \frac{c c_1\left[\pm m_1 c k_D + F\right]}{(c + c_1)\left[m c c_1^2 - k_D\left(\pm m_1 c c_1 \pm F + c \cdot m_1 \cdot k_D\right)\right]}. \qquad (8)$$

Из выражения (8) следует, что эффективность пропорциональной дополнительной обратной связи не зависит от массы движущихся частей привода. Также из этого соотношения видно, что данная дополнительная обратная связь может быть эффективна $(k_{10} < 1)$ как при положительном (верхний знак соотношения), так и при отрицательном (нижний знак соотношения) коэффициентах усиления k_D этой связи. В первом случае должно соблюдаться условие

$$m_1 \cdot c \cdot c_1^2 > m_1 \cdot c \cdot k_D (c + c_1) + m \cdot c_1 (c + c_1)^2,$$

а во втором -

$$m \cdot c_1 (c + c_1)^2 > m_1 \cdot c \cdot k_D (c + c_1) + m_1 \cdot c \cdot c_1^2.$$

Определим оптимальное значение коэффициента усиления, которое обеспечит минимальную интегральную оценку (7) и, соответственно, минимальное время переходного процесса по координате отклонения массы исполнительного механизма от положения равновесия. Для этого воспользуемся следующей зависимостью

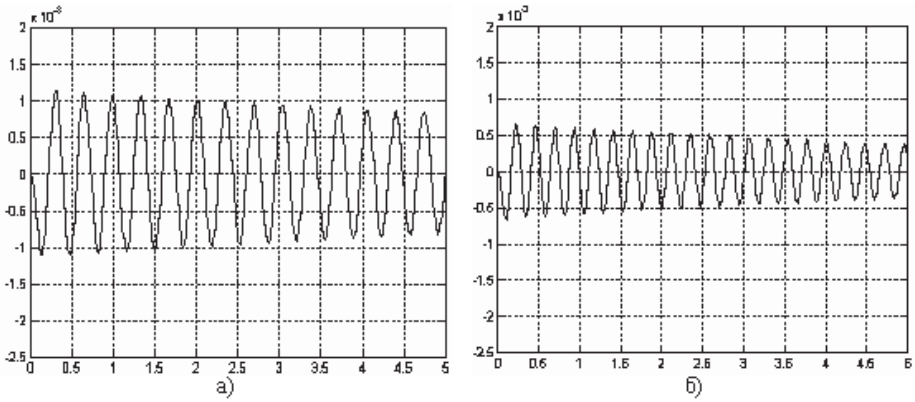


Рис.7. Упругие колебания трехмассовой системы.

$$\frac{\partial J_1}{\partial k_D} = \frac{Q_0 \cdot c^2 \cdot m_1^2 \cdot k_D^2 + 2 \cdot Q_0 \cdot c \cdot m_1 \cdot F \cdot k_D + Q_0 \cdot m \cdot c_1^2 \cdot A}{2 \cdot b \cdot \left[c \cdot m_1 \cdot k_D^2 + \left(S + c_1^2 \cdot m \right) \cdot k_D - c_1^2 \cdot c \cdot m \right]^2}, \quad (9)$$

где $A = \left(F + m \cdot c^2 + S \right)$, $S = c_1 \cdot c \cdot \left(m - m_1 \right)$.

Из выражения (9) определим значение коэффициента усиления пропорциональной дополнительной связи, обеспечивающее наибольшую степень затухания колебаний

$$k_D^{opt} = \frac{c_1}{c \cdot m_1} \left[-m \cdot \left(c + c_1 \right) \pm \sqrt{m \cdot m_1 \cdot c \cdot c_1} \right]. \quad (10)$$

Зависимость (10) показывает, что при изменениях параметров системы и конфигурации исполнительных органов, будут изменяться значения оптимальных коэффициентов k_D^{opt}. Анализ устойчивости системы с отрицательной пропорциональной обратной связью показывает, что коэффициент усиления этой связи ограничен величиной

$$k_D^{np} = \frac{c_1}{2 \cdot c \cdot m_1} \cdot \left[m \cdot \left(c_1 + c \right) - c \cdot m_1 \pm \right.$$
$$\left. \pm \sqrt{m^2 \cdot \left(c_1 + c \right)^2 + 2 \cdot c \cdot m \cdot m_1 \left(c - c_1 \right) + c^2 \cdot m_1^2} \right]. \quad (11)$$

Проведенное на основе зависимостей (10), (11) моделирование показало, что пропорциональная дополнительная связь может быть эффективна только при положительном коэффициенте усиления k_D данной связи. В качестве иллюстрации на рис. 7 приведены графики упругих колебаний механизма для системы со следующими параметрами: $m_n = 40$кг; $m_1 = 25$кг; $m = 10$кг; $c_1 = 1{,}5 \cdot 10^4$ Н/м; $c = 0{,}8 \cdot 10^4$ Н/м; $b = 15$ НМс/м. Переходная характеристика исходной системы приведена на рис. 7*а*. На рис. 7*б* — переходная характеристика системы при положительной пропорциональной обратной связи.

Анализ графиков показал, что пропорциональная дополнительная связь позволяет почти в два раза снизить амплитуду упругих колебаний. Таким образом, активная компенсация упругих колебаний с помощью дополнительных обратных связей возможна и в трехмассовых колебательных системах.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Елисеев, С. В. Управление колебаниями роботов / С. В. Елисеев, Н. К. Кузнецов, А. В. Лукьянов. — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. — 320 с.
2. Крутько, П.Д. Управление движением упругих многомассовых систем / П.Д. Крутько // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1991. - №4. — С. 90-96.
3. Кузнецов, Н. К. Управление движением упругих систем на основе позиционных координат / Н. К. Кузнецов, А. А. Савченко // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении : сб. науч. тр. / Иркут. гос. техн. ун-т. — Иркутск, 2000. — С. 144-148.
4. Кузнецов, Н. К. Управление движением трехмассовой колебательной системы / Н. К. Кузнецов, А. Ю. Перелыгина // Проблемы механики современных машин : Материалы третьей международной конференции / ВСГТУ. — Ула-Удэ, 2006. — Т. 1. — С. 188-191.
5. Топчеев, Ю. И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. / Ю. И. Топчеев. — М. : Машиностроение, 1989. — 752 с.

Свитачев А. И., Орловский С.Н.

УДК 630.432.31.002.5

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ С АКТИВНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

Условия работы различного рода транспортных машин определяют новые требования к специальным лесохозяйственным тракторам по массе, энергетическим и динамическим параметрам, тягово-сцепным свойствам, ходовому аппарату, компоновочной схеме. Оценка воздействия конструктивных изменений трактора и выбор конструктивных параметров и режимов работы активных рабочих органов агрегатируемых с ним машин должны сопровождаться проверкой динамической нагруженности силовых передач лесохозяйственных агрегатов. При этом следует учитывать возможность возникновения резонансных колебаний в трансмиссии агрегата. Данная работа посвящена анализу динамической нагруженности силовых передач трактора ДТ-75Б с орудием МДН-3 и трактора ЛХТ-55 с плугом.

Анализ динамических моделей машинно-тракторных лесохозяйственных агрегатов показал, что наиболее распространёнными являются модели в виде сложных крутильных колебательных систем. Моделирование и оптимизация динамической нагруженности силовых передач лесохозяйственных агрегатов с пассивными рабочими органами реально можно выполнять с достаточной точностью и достоверностью на основании математических моделей цепочных и разветвленных динамических систем от шести до десяти масс [1].

Шестимассовая цепочная эквивалентная динамическая схема, которая положена в основу исследований нагруженности и динамических свойств трансмиссии ЛХТ - 55, приведена на рис. 1.

При исследованиях лесохозяйственных агрегатов с активными рабочими органами, особенно имеющими значительный момент инерции, шестимассовая цепочная эквивалентная динамическая схема системы, представленная на рис. 1, должна быть заменена разветвлённой схемой, учитывающей реализацию крутящего момента двигателя на привод активного рабочего органа и движителей трактора (рис. 2).

Верхняя по схеме ветвь трансмиссии привода рабочего органа, включающая массы двигателя с маховиком и сцеплением $J_д$, вала привода коробки передач с шарнирами $J_к$, вала отбора мощности с редуктором $J_{вом}$, карданного вала привода рабочего органа с редуктором $J_{р.о.}$, вала привода фрезы с фрезой в сбо-

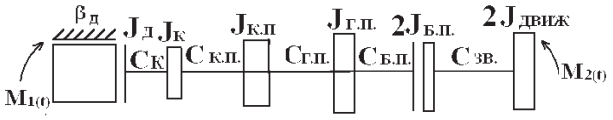


Рис. 1. Шестимассовая эквивалентная динамическая схема: J - приведённые моменты инерции механизмов трактора и орудия или трелюемой пачки; *c* - приведенные коэффициенты жесткости участков трансмиссии; $M_1(t)$- крутящий момент от двигателя; $M_2(t)$ - момент сопротивления от разрабатываемой среды или волока.

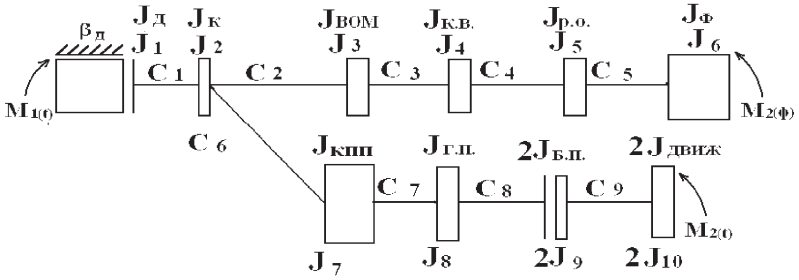


Рис. 2. Разветвлённая десятимассовая эквивалентная динамическая схема системы при использовании основного потока мощности через ВОМ трактора с классической кинематической схемой типа ДТ – 75 с орудием.

ре $J_ф$. Нижняя ветвь — привод ходовой части тракторы от коробки передач $J_{кпп}$, через главную передачу $J_{гп}$, бортовые передачи $J_{бп}$ и движители $J_{движ}$.

При исследовании сложных динамических систем, которыми являются трансмиссии, встаёт задача нахождения передаточных функций, а по ним амплитудно — частотных и фазово — частотных характеристик. Ниже предлагается следующий алгоритм их нахождения.

Многомассовая механическая система в линейном приближении может быть представлена системой дифференциальных уравнений (в матричном виде)

$$J \cdot V'' + B \cdot V' + C \cdot V = P(t), \qquad (1)$$

где — *J, B, C* - матрицы моментов инерции, коэффициентов демпфирования, жёсткостей; P(t) - вектор возмущающих воздействий; *V(t)* - вектор угла закрутки масс системы. Применяя преобразование Лапласа к выражению (1), в предположении нулевых начальных условий, получим уравнение относительно изображений переменных y_i (s) в матричной форме

$$V(s) = W(s) \cdot P(s),$$

где - *W(s)* матрица передаточных функций.

$$W(s) = \left[Js^2 + Bs + C\right]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \cdot \left(A_{ij}\right)_{nn}, \qquad (2)$$

$$\Delta = \left\|\left[J \cdot s^2 + B \cdot s + C\right]\right\| = \left|\left(a_{ij}\right)_{nn}\right| - \text{определитель.}$$

Амплитудно-частотные характеристики находились по передаточным функциям по методике изложенной в работе [2].

Гусеничные машины характеризуются довольно сложным воздействием на трансмиссию со стороны движителя. Проявление возмущения от гусеничного зацепления наблюдается на валу муфты сцепления и особенно сильно при резонансных режимах работы трансмиссии агрегата. Частотные диапазоны от воздействия гусеничного зацепления определяются по формуле [3]

$$\omega_{Г3} = 2 \cdot \pi \cdot n_k \cdot z_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_Д \cdot z_k}{i_{тр}} = \frac{v \cdot z_k}{r_k}, \qquad (3)$$

где $n_Д$ и $n_к$ — частоты вращения коленчатого вала двигателя и ведущих звёздочек гусениц; $z_к$ - число зубьев ведущих звёздочек гусениц; $i_{тр}$ — передаточное число трансмиссии; v — скорость движения трактора; $r_к$ - радиус ведущей звёздочки. Частотные диапазоны от взаимодействия активных рабочих органов с разрабатываемой средой определяются по формуле

$$\omega_{P.O} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{P.O.} \cdot z_H}{i_{BOM} \cdot i_{PO}}, \qquad (4)$$

где $n_{P.O.}$ — частота вращения рабочего органа; z_H — число ножей (резцов) на рабочем органе; i_{BOM} — передаточное отношение редуктора ВОМ; i_{PO} — передаточное отношение редуктора орудия.

При изменении средней скорости движения лесохозяйственного агрегата ЛХТ - 4 от 0,63 до 1,19 м/с (l - lV передачи) частота гусеничного воздействия изменяется от 37,05 до 70,00 рад/с, для трактора ЛХТ — 55 значения $ш_{Г3}$ на рабочих передачах составят 37,01 — 64,76 рад/с, для ЛХТ — 100 А они составят 31,19 — 54,58 рад/с. Трансмиссия трактора ДТ — 75 Б при использовании на лесомелиоративных работах с щелерезными дискофрезерными орудиями испытывает частоту гусеничного воздействия 6,82 — 9,34 и 16,16 — 22,27 рад/с соответственно в зимний и летний периоды. Со стороны орудий она нагружена частотами 716,22 — 994,75 и 733,23 — 1018 рад/с для орудий ЩДМ — 1 и МДН — 3 соответственно.

Для оценки динамических свойств трансмиссий лесохозяйственных агрегатов нами находились их АЧХ. В цепочной трансмиссии (рис. 3 а, б) изменялся момент инерции маховика двигателя $J_{мах}$ с 2,9 (базовый вариант) до 6 кгм^2 согласно рекомендациям [4]. В разветвлённой сравнивались варианты изменения $J_{мах}$ и фрезерного рабочего органа $J_{фр}$. Как следует из расчётов АЧХ для лесохозяйственного агрегата на базе трактора ЛХТ — 55 с пассивным рабочим органом, при его движении на первой передаче со стандартным и увеличенным маховиками ($J_{мах}$ = 2,9 и 6 кгм^2), существенные амплитуды колебаний наблюдаются в области собственных частот и резонансы при совпадении с собственными частотами, причём колебания от движителей распространяются по всей трансмиссии и доходят до первичного вала коробки передач, от двигателя — значительно уступают по амплитуде.

Сравнение АЧХ рис. 3 а, б показывает, что при увеличении $J_{мах}$ с 2.9 до 6 кгм^2 существенных изменений частот колебаний трансмиссии не наблюдается. Увеличение момента инерции $J_{мах}$ в указанных пределах приводит к уменьшению первой собственной частоты и незначительному снижению амплитуд коле-

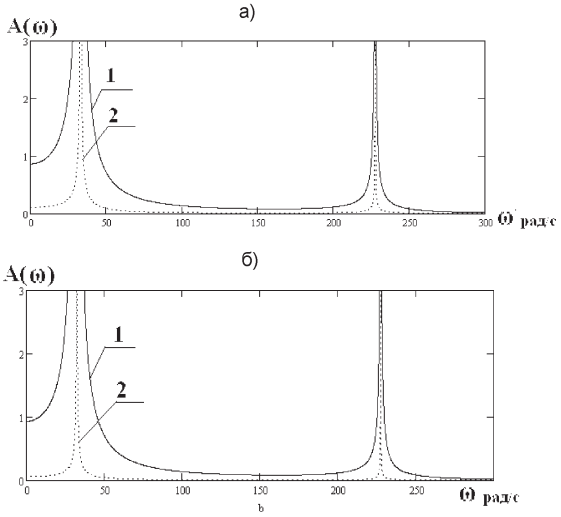


Рис. 3. АЧХ трансмиссии ЛХТ - 55.
Воздействия: 1- от гусениц на вал КПП; 2- от двигателя на валы бортовых передач. а) - $J_{мах}$=2,9 кгм^2, б) - $J_{мах}$=6 кгм^2, 1 пер.

баний и не вызывает резонансных явлений в трансмиссии трактора. При этом энергия от воздействия гусеничного зацепления распространяется по ветви трансмиссии, а распространение колебаний в направлении трактора значительно затухает. Частоты, вызываемые воздействием гусеничного зацепления ЛХТ — 55, составляют 37,01 рад/с и не налагаются на частоты собственных колебаний.

Анализ динамики десятимассовой схемы трансмиссии лесомелиоративного агрегата в составе трактора ДТ — 75 Б с орудиями МДН — 3 и ЩДМ -1, имеющим активный рабочий орган для различных вариантов изменения $J_{мах}$ и $J_{фр}$ представлен на графиках АЧХ рис. 4 а - г. Скорость движения агрегата при расчётах принималась постоянной 0,2 м/с, согласно технической характеристике орудий; значения $J_{мах}$ принимались 2,9 и 8,0 кгм^2; приведённый к коленчатому валу двигателя $J_{фр}$ 1,15 и 3,61 кгм^2.

Из анализа данных АЧХ трактора ДТ — 75 Б с дискофрезерным орудием следует, что энергия от воздействия $J_{фр}$ сосредоточена в частотах 40 и 230 рад/с. Энергия от воздействия на трансмиссию гусеничного зацепления возрастает в диапазоне частот 190 — 210 рад/с и распространяется по ветви трансмиссии, в направлении трактора колебания затухают, поэтому выделение на АЧХ зон вынужденных колебаний трансмиссии со стороны рабочих органов и согласование конструкций рабочих органов с трансмиссиями тракторных агрегатов представляется необходимым.

Влияние передаточных чисел и жёсткостей участка привода орудия на изменение

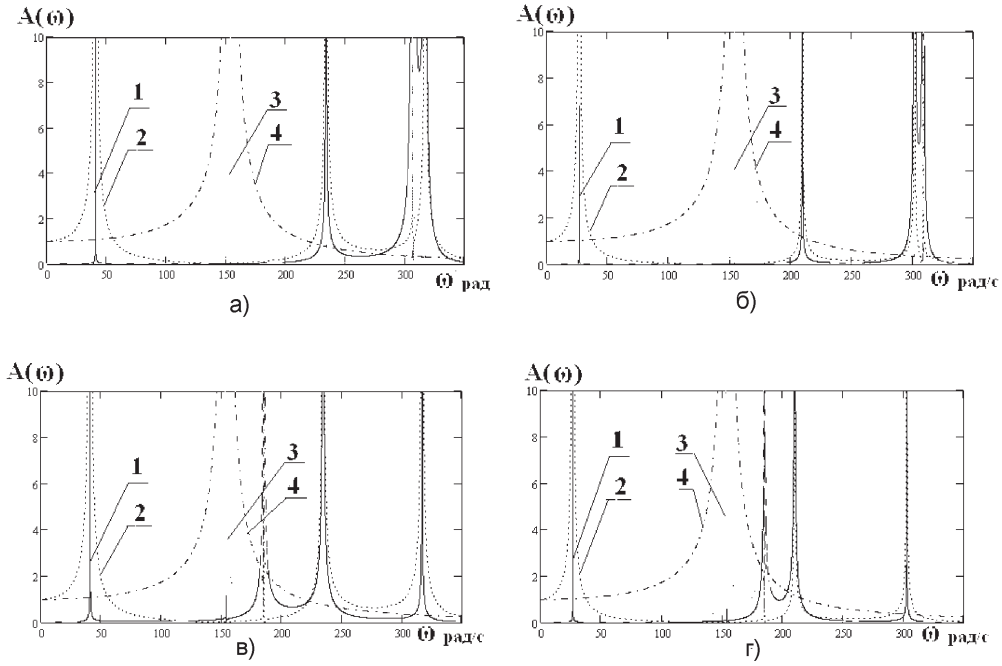


Рис. 4. АЧХ трансмиссии ДТ-75 с орудием, имеющим активный рабочий орган (ЩДМ – 1). Воздействия: 1- от фрезы на вал сцепления; 2- от фрезы на ВОМ; 3 – от двигатель на фрезу; 4 – от фрезы на КПП, а) - $J_{дв}$=2.9 кгм^2; $J_{фр}$=1.15 кгм^2; б) - $J_{дв}$=2.9 кгм^2; $J_{фр}$=3,61 кгм^2; в) - $J_{дв}$=8 кгм^2; $J_{фр}$=1.15 кгм^2; г) - $J_{дв}$=8 кгм^2; $J_{фр}$=3.61 кгм^2.

динамических свойств и характеристик трансмиссии агрегата может моделироваться по методике [2]. Предпочтительным представляется увеличение передаточного числа редуктора орудия, поскольку в данном случае жёсткость участка уменьшается, две первые собственные частоты расходятся, а третья увеличивается, что благоприятно сказывается на частотном диапазоне низкочастотных возмущающих колебаний в плане отстройки от резонанса. При необходимости в силовую цепь трансмиссии на участке «ВОМ — рабочий орган» должны устанавливаться демпфирующие устройства, что позволяет значительно снизить значения амплитуд, особенно в области высоких частот. Увеличение передаточного числа редуктора ВОМ в 1,8 раза приводит к снижению амплитуд колебаний до 30 — 40 %. При выборе значений передаточных чисел необходимо проведение многокритериальной оптимизации по методике [2].

Выбор направления модернизации агрегата в направлении изменения момента инерции вращающихся масс должен определяться изменением $J_{фр}$, которое возможно менять только при модернизации трактора, хотя возможно применение дополнительного маховика в его трансмиссии.

Представленные математические модели позволяют определить оптимальные энергетические и динамические параметры лесохозяйственных агрегатов, рассчитать нагруженность участков трансмиссии агрегатов, прогнозировать изменение силовой нагруженности при конструктивных изменениях базовой машины. Последнее позволяет обосновать агрегатирование трактора с орудиями, имеющими активные рабочие органы, в направлении выбора масс и моментов инерции вращающихся масс с целью предотвращения резонансных явлений в трансмиссиях агрегатов. На основании математических моделей динамических систем можно произвести согласование возбуждающих частот со стороны рабочего органа и собственных частот колебаний трансмиссий, чтобы исключить резонансные режимы работы.

Выводы.

Из анализа АЧХ тракторных агрегатов с пассивными рабочими органами можно отметить, что при увеличении момента инерции маховика двигателя с 2.9 до 6 кгм^2 существенных изменений частот колебаний трансмиссии трактора и резонансных явлений в ней не наблюдается. Частоты, вызываемые воздействием гусеничного зацепления не налагаются на частоты собственных колебаний.

В агрегатах с активными рабочими органами анализ АЧХ показал:

- усиленные колебания наблюдаются на участке трансмиссии с минимальной жёсткостью между первичным валом ходоуменьшителя и редуктором ВОМ;
- увеличение момента инерции маховика двигателя не вызывает существенных изменений АЧХ и не вызывает резонансных явлений в трансмиссии трактора;
- увеличение момента инерции дисковой фрезы снижает уровень колебательных процессов в трансмиссии агрегата;
- частоты, вызываемые воздействием гусеничного зацепления (6,8 и 22,3 рад/с), не попадают в резонанс;
- частоты, вызываемые взаимодействием фрезы с разрабатываемой средой (716 - 1018 рад/с), не оказывают существенного влияния на динамическую нагруженность участков трансмиссии агрегата.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Орловский С. Н. Нейросетевая оптимизация динамических параметров тракторных агрегатов [Текст] / С. Н. Орловский, Т. Ф. Басканова, Ю. П. Ланкин // Нейрокомпьютеры и их применение // Сб. научн. тр. с междунар. Участием. VIII Всероссийская конференция «НКП-2002».- М.: ИПУ РАН, 2002.- ISBN 5-201-14935-9. С. 42-47.
2. Свитачев А.И. Динамика трансмиссий гусеничных тракторов с учётом навесного оборудования [Текст] / А.И. Свитачев; - Красноярск; Изд-во КрасГАУ, 2005.- 190 с.
3. Свитачев А. И., Свитачева М. П. Изменение свойств динамической нагруженности трансмиссии трактора с учётом навесного оборудования // Лесоэксплуатация. Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 5. СибГТУ, Красноярск, 2004. С.237 — 244.
4. Орловский С. Н. Обоснование оптимальных параметров и рабочих режимов тракторных мелиоративных агрегатов [Текст] / С. Н. Орловский // Ресурсосберегающие технологии механизации сельского хозяйства: прил. к «Вестн. КрасГАУ»: сб. научн. ст. / Краснояр. гос. аграрн. ун-т. - . Красноярск, 2003. — С. 128 — 139.

Засядко А.А., Упырь Р.Ю., Логунов А.С., Насников Д.Н. УДК 656.001

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К ЗАДАЧАМ ДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Задачи виброзащиты и виброизоляции предполагают поиск параметров движения объекта (перемещений, скоростей, ускорений, сил реакций) при заданных внешних воздействиях (силовых или кинематических). В отличие от анализа, динамический синтез можно отнести к обратным задачам, когда при известных внешних воздействиях, силах реакции, параметрах движения, требуется определить (или построить) механическую цепь (или структурную схему системы), а затем на ее основе воссоздать динамическую систему и ее параметры. Отметим, что, как правило, в обратных задачах не существует однозначного решения (если только оно существует вообще), поэтому особое значение приобретает при выборе системы возможность ее физической реализации. Использование дуальных механических цепей интересно тем, что в представлениях их частотных характеристик каждому члену математического выражения (передаточной функции системы или некоторому варианту передаточной функции системы) — соответствует определенный элемент цепи, а структура математического выражения соответствует определенной схеме соединения этих элементов в механической цепи [1].

В работах [2,3,4] показано, что в механической колебательной системе при гармоническом воздействии можно выделить комплексное сопротивление $\overline{S}(p)$ или комплексную подвижность $\overline{A}(p)$, а также ряд других характеристик. Комплексное сопротивление $\overline{S}(p)$, к примеру, является [2,3] элементом с передаточной функцией вида

$$\overline{W}(p)=\frac{\overline{Q}(p)}{\overline{V}(p)}, \qquad (1)$$

а комплексная подвижность $\overline{\Pi}(p)$ - элементом с передаточной функцией

$$\overline{W_1}(p)=\frac{\overline{V}(p)}{Q(p)}, \qquad (2)$$

где $\overline{Q}(p)$ - изображение (по Лапласу) внешнего воздействия Q; $\overline{V}(p)$ - изображение скорости объекта защиты V в точке приложения силы.

Если речь идет о механических системах, описываемых на уровне передаточных функций, что является одним из частных случаев представления динамического состояния [6], для которого внешние возмущения могут быть представлены как силовые - $Q(t)$ или как кинематические $V(t)$, то состояние системы оценивается скоростями точек.

Использование передаточных функций по скорости (выражение (1)) представляет интерес, так как существует достаточно развитая материально-техническая база, получившая название импедансной [4].

Полученные на основе таких технологий частотные характеристики являются основой для получения информации о возможной структуре системы. Последнее фиксируется передаточной функцией, что позволяет в ряде случаев получать необходимые сведения о структурной схеме системы, которая не всегда бывает очевидной.

Таким образом, определение вида структурной схемы по известной передаточной функции можно отнести к так называемым обратным задачам, в решении которых могут быть определены физические формы реализации звеньев.

В общем случае передаточная функция механической системы (1) или комплексное сопротивление (подвижность механической цепи (в данном случае - дуальной)) может быть

представлена [5] как дробно-рациональная функция:

$$\bar{S}(p) = H\frac{(p-p_1)(p-p_3).....(p-p_n)}{(p-p_2)(p-p_4)....(p-p_m)}, \qquad (3)$$

здесь $H = \frac{a_n}{b_m}$ представляет собой масштабный коэффициент [6], все полюсы $p_m = \beta_m + j\omega_m$ лежат в левой части комплексной плоскости, то есть $\beta_m \le 0$, в том числе они могут лежать на мнимой оси $p_m = \beta_m + j\omega_m$ и являются простыми — не кратными — полюсами. Все нули $p_n = \beta_n + j\omega_n$ входных функций лежат в левой полуплоскости, в том числе, они могут лежать и на мнимой оси.

Основными свойствами системы, в таком случае, является то обстоятельство, что коэффициенты передаточной функции будут положительными, а наибольшие степени числителя и знаменателя отличаются только на единицу. Важным было бы отметить, что при динамическом синтезе основное значение приобретает выбор группы параметров для описания процессов взаимодействия между элементами системы. Как показано в работе [7], такие группы могут формироваться с учетом последующих возможностей использования для исследований методов электромеханических аналогий. В этом плане, определенным преимуществом является использование, в частности, выражения (1) в физической трактовке понятий, предложенной в работе [1,7].

Для определения составляющих механических цепей воспользуемся теорией цепных или непрерывных дробей [1], полагая, что $\bar{S}(p)$ можно представить также дробно-рациональным выражением вида

$$S(p) = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \ldots + a_n p^n}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \ldots + b_m p^m}, \qquad (4)$$

где a_i, b_j $(i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,m})$ — коэффициенты, зависящие от физических параметров колебательной системы и её сложности.

В общем случае простейшая цепная дробь имеет вид

$$a_0 + \cfrac{1}{a_1 + \cfrac{1}{a_2 + \cfrac{1}{a_3 + \cfrac{1}{a_4 + \ldots\ldots \cfrac{}{a_{n-1} + \cfrac{1}{n}}}}}} \qquad (5)$$

и называется n — членной цепной дробью. Заметим, что при алгебраическом делении числителя на знаменатель, можно получить

$$\bar{S}(p) = a_i p + \frac{Q(p)}{R(p)}. \qquad (6)$$

Причем второй член $\frac{Q(p)}{R(p)}$ является остатком, $Q(p)$ - полиномом степени (2n-2), $R(p)$ - полиномом степени (n-1). Возьмем обратную величину остатка и произведем деление, тогда

$$\bar{S}(p) = a_i p + \frac{1}{b_i p + \frac{Q(p)}{R(p)}}, \qquad (7)$$

где $R(p)$ - многочлен степени (2n-3) — на единицу меньше степени полинома $Q(p)$.

Продолжая процесс деления, можно получить

$$\bar{S}(p) = a_1 p + \cfrac{1}{b_1 p + \cfrac{1}{a_2 p + \cfrac{1}{b_2 p + \cfrac{1}{a_3 p + \ldots\ldots \cfrac{}{a_n p + \cfrac{1}{b_n p}}}}}}. \qquad (8)$$

При использовании соотношений (1), выражение (8) преобразуется к виду, имеющему лестничное построение:

$$\bar{S}(p) = S_1 + \cfrac{1}{\Lambda_2 + \cfrac{1}{S_3 + \cfrac{1}{\Lambda_4 + \cfrac{1}{S_5 + \ldots\ldots \cfrac{}{S_{n-1} + \cfrac{1}{\Lambda_n}}}}}}. \qquad (9)$$

Примем

$$\bar{S}(p) = S_1 + S_{\Sigma 1};\ S_{\Sigma 1} = \frac{1}{\frac{1}{S_2} + S_{\Sigma 2}};\ S_{\Sigma 2} = S_3 + S_{\Sigma 3};$$

$$S_{\Sigma 3} = \frac{1}{\frac{1}{S_4} + S_{\Sigma 4}}. \qquad (10)$$

Сравнивая (9) и (10), отметим, что $S_i = a_i p$, $\Lambda_i = b_i p$. При отображении соотношений как механической цепи, можно получить элементы, вводимые параллельно — как прямые сопротивления, а элементы, включенные последовательно — как подвижности. На рис. 1 приведена структура дуальной механической цепи, соответствующая выражениям (8) и (9).

Рассмотрим пример, в котором

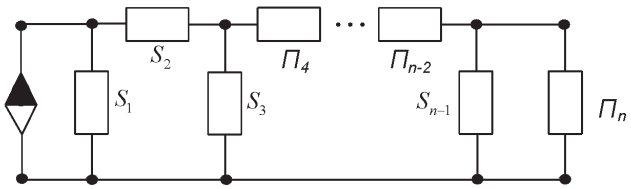


Рис.1. Механическая цепь, соответствующая математической модели (8).

$$S(p)=\frac{p^2+6p+8}{0{,}01p^2+0{,}04p+0{,}03}, \qquad (11)$$

и требуется найти динамическую систему (ее структуру) и параметры. Разделим числитель (11) на знаменатель:

$$\begin{array}{r|l} -\,p^2+6p+8 & 0{,}01p^2+0{,}04p+0{,}03 \\ \underline{p^2+4p+3} & \overline{100} \\ 2p+5 & \end{array} \qquad (12)$$

получим -

$$S(p)=100+\frac{2p+5}{0{,}01p^2+0{,}04p+0{,}03}. \qquad (13)$$

Отметим, что в параллельной цепи (Рис.1) используется элемент сопротивления $S_i=r_i=100\,кгс\times c\,/\,m$. В данной системе принятых обозначений сопротивление массы $S_i=pm$, сопротивление упругости - $S_к=\frac{к}{p}$, а сопротивление демпфера - $S_r=r$. Поэтому коэффициент при умножении на р есть величина массы с размерностью $кгс\times c^2\,/\,m$; коэффициент при делении на р есть величина упругости с размерностью $кгс\,/\,m$ и коэффициент без использования р есть величина сопротивления с размерностью $кгс\times c\,/\,m$.

Выделим из (13) неправильную дробь:

$$\frac{2p+5}{0{,}01p^2+0{,}04p+0{,}03}=\frac{1}{\dfrac{0{,}01p^2+0{,}04p+0{,}03}{2p+5}}, \qquad (14)$$

найдем целую часть —

$$\begin{array}{r|l} -\,0{,}01p^2+0{,}04p+0{,}03 & 2p+5 \\ \underline{0{,}01p^2+0{,}025p} & \overline{0{,}05} \\ 0{,}015p+0{,}03 & \end{array} \qquad (15)$$

откуда $П_2=0{,}005p$ или $\frac{1}{S_2}=\frac{p}{200}$; $S_2=\frac{200}{p}$.

Таким образом, в последовательной части цепи может быть (Рис.1) расположен элемент упругости $S_2=200кгс\,/\,m=k_1$, тогда выражение (13) запишется виде:

$$S(p)=100+\frac{1}{0{,}05p+\dfrac{0{,}01p^2+0{,}04p+0{,}03}{2p+5}}. \qquad (16)$$

Выделим у третьего члена выражения (16) неправильную дробь

$$\frac{0{,}015p+0{,}003}{2p+5}=\frac{1}{\dfrac{2p+5}{0{,}015p+0{,}003}}. \qquad (17)$$

Найдем целую часть.

$$\begin{array}{r|l} -\,2p+5 & 0{,}015p+0{,}03 \\ \underline{2p+4} & \overline{\dfrac{400}{3}} \\ 1 & \end{array} \qquad (18)$$

Тогда $S_3=\frac{400}{3}=133{,}3кгс\times c/m$ и этот элемент сопротивления будет располагаться в параллельной цепи (r_2):

$$\bar{S}(p)=100+\frac{1}{0{,}005p+\dfrac{1}{\dfrac{400}{3}+\dfrac{1}{0{,}015p+0{,}03}}}. \qquad (19)$$

Остаток, если его представить в виде неправильной дроби

$$\frac{1}{0{,}005p+0{,}03}=\frac{1}{\dfrac{1}{S_4}+\dfrac{1}{S_5}}, \qquad (20)$$

что позволяет записать:

$$П_4=\frac{1}{S_4}=0{,}005p;\ S_4=\frac{1}{0{,}005p}=\frac{66{,}6}{p};\ k_2=66{,}6кгс/m;$$

$$П_5=\frac{1}{S_5}=0{,}03;\ S_5=\frac{1}{0{,}03}=33{,}3;\ r_3=33{,}3кгс\times c\,/\,m.$$

В структуре цепи элементы S_4, S_5 соединены последовательно, как это показано на рис. 2а, что в целом соответствует расчетной схеме (Рис.2б) в виде механической колебательной системы из пружин и демпферов.

Последовательность преобразований исходного выражения (10) можно представить через систему последовательных изменений структуры механической цепи (Рис.3а, б, в, г). Свертка дуальной цепи позволяет получить исходное выражение (11).

Если полагать, что в точках А, В, С (Рис.2) будут учитываться массы m_1, m_2, m_3, то расчетная схема примет вид схемы, приведенной на Рис.4, а ее структурная интерпретация будет представлена соответственно на Рис.5.

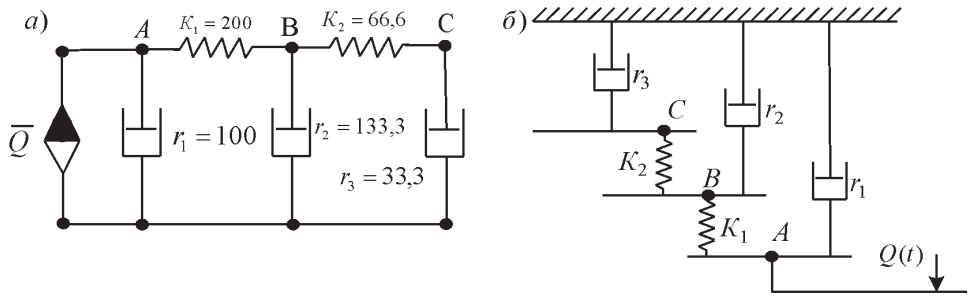


Рис.2. Синтез механической системы: а – дуальная механическая цепь, б – расчетная схема.

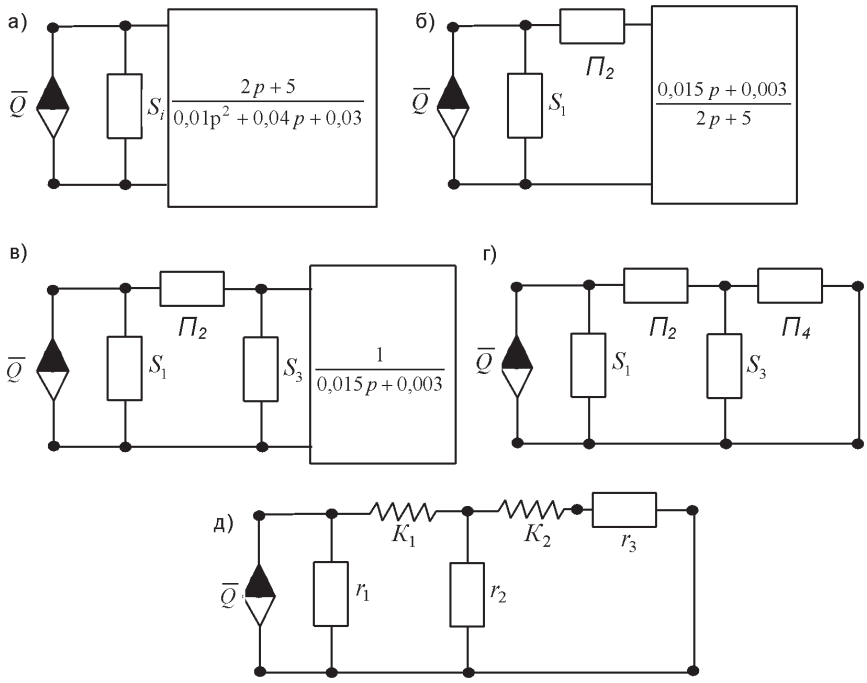


Рис.3. Последовательность структурных интерпретаций преобразования выражений (11)-(20).

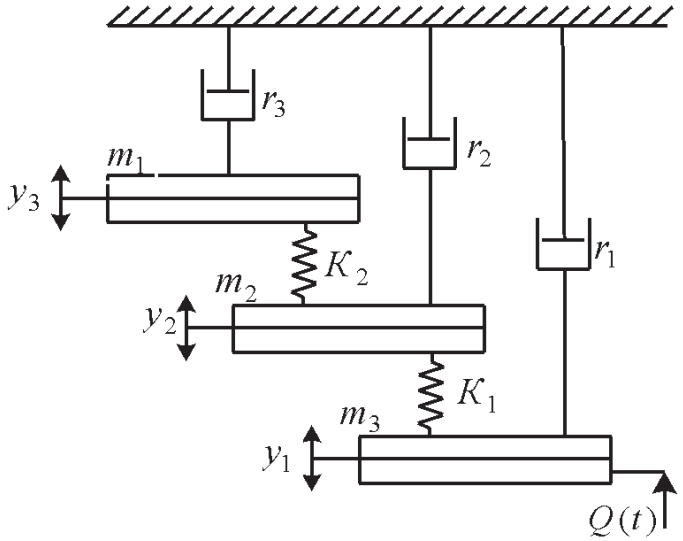


Рис.4. Расчетная схема системы, содержащая массовые элементы m_1, m_2, m_3.

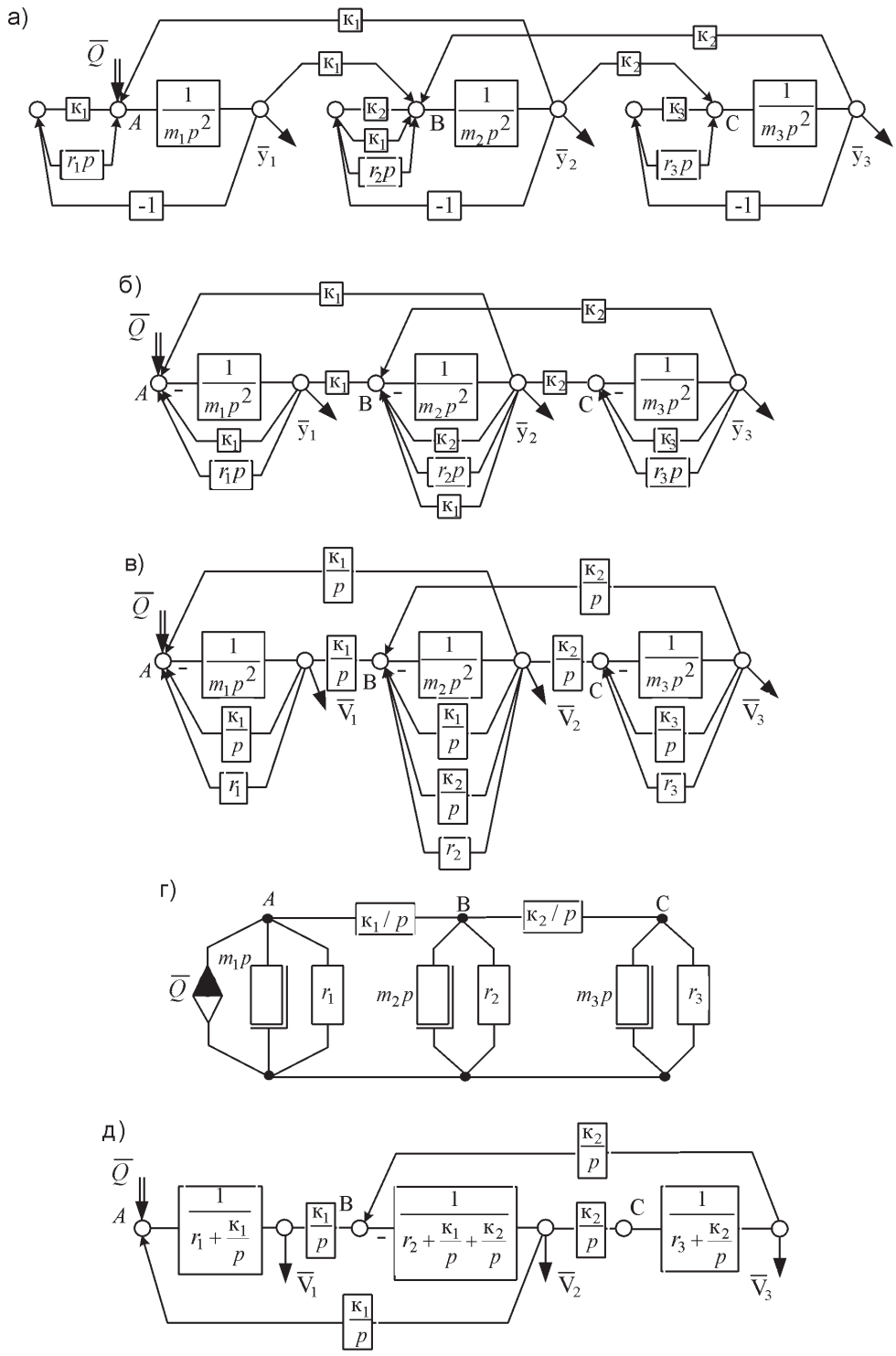


Рис.5. Структурные интерпретации исходной расчетной схемы (Рис.4) при различных подходах: а) структурная схема системы (Рис.4) при силовом входном воздействии и выходных параметрах в форме абсолютных перемещений; б) структурная схема системы (Рис.4), преобразованная для последующих интерпретаций в механическую цепь с параметрами состояния в виде абсолютных перемещений; в) структурная схема системы (Рис.4), преобразованная для последующего построения дуальной механической цепи с параметрами состояния виде абсолютных скоростей точек; г) схема дуальной механической цепи, соответствующей расчетной схеме (Рис.4) и структурной схеме (Рис.5б); д) схема дуальной механической цепи, соответствующей расчетной схемы системы, приведенной на рис.4, при $m_1=m_2=m_3=0$.

Используя структурную схему (на Рис.5а, б, в, г, д), можно определить передаточную функцию системы при силовом возмущении, если $m_1 = m_2 = m_3 = 0$:

$$\overline{W}(p) = \frac{\overline{y}_1}{\overline{Q}} = \frac{E - k_2^{\,2}}{\left(E - \mathrm{k}_2^2\right)\left(r_1 p + \mathrm{k}_1\right) - k_1^2\left(r_3 p + \mathrm{k}_2\right)}, \quad (21)$$

где $E = \left(r_3 p + \mathrm{k}_2\right)\left(r_2 p + \mathrm{k}_1 + \mathrm{k}_2\right)$.

Если принять во внимание, что

$$\overline{W}(p) = \frac{\overline{y}_1}{\overline{Q}}, \text{ а } \overline{S} = \frac{\overline{Q}}{\overline{y}_1 p}, \text{ то } \overline{S} = \frac{1}{\overline{W}(p)\cdot p}. \quad (22)$$

Связь между полным сопротивлением $\overline{S}$ и передаточной функцией $\overline{W}$ дает представление о возможном использовании двух подходов оценки динамического состояния систем; на основе структурных схем, эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления (САУ) и дуальных механических систем. В частности, из (21) и (22) следует, что —

$$\overline{S_A} = \frac{p^2 r_1 r_2 r_3 + p^2(\mathrm{k}_1 r_2 r_3 + \mathrm{k}_1 r_1 r_3 + \mathrm{k}_2 r_1 r_3 + \mathrm{k}_2 r_1 r_2)}{p^2 r_2 r_3 + p^2(\mathrm{k}_1 r_3 + \mathrm{k}_2 r_3 + \mathrm{k}_2 r_2) + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2} + \frac{\mathrm{k}_1\mathrm{k}_2 r_3 + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2 r_2 + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2 r_1}{p^2 r_2 r_3 + p^2(\mathrm{k}_1 r_3 + \mathrm{k}_2 r_3 + \mathrm{k}_2 r_2) + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2}, \quad (23)$$

где $\overline{S_A}$ - соответствует точке С на схеме по рис.2а.

Такой же результат можно получить из прямых преобразований, на схеме приведенной на Рис.2а. Разница двух подходов формально заключается в том, что в преобразованиях дуальных цепных схем используются правила параллельных и последовательных соединений, тогда как в структурных преобразованиях на основе САУ используется более широкая группа правил (обратная связь, переносы и т.д.)[5].

Возвращаясь к задачам динамического синтеза, отметим, что из (8) можно, зануляя ряд параметров, получать частные формы выражения (или полного сопротивления в цепи на Рис.2а,б), что дает представление о зависимости между структурой цепи и формой $\overline{S}$ (табл.1).

Для точек В и С получим в соответствии с (23)

$$\overline{S_B} = \frac{C_1}{p^2 r_1 r_2 + p^2(\mathrm{k}_1 r_3 + \mathrm{k}_2 r_1) + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2}, \quad (24)$$

$$\overline{S_C} = \frac{C_1}{p^2 r_1 r_2 + p^2(\mathrm{k}_1 r_1 + \mathrm{k}_1 r_2 + \mathrm{k}_2 r_1) + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2}, \quad (25)$$

здесь

$$C_1 = p^2 r_1 r_2 r_3 + p^2(\mathrm{k}_1 r_2 r_3 + \mathrm{k}_1 r_1 r_3 + \mathrm{k}_2 r_1 r_3 + \mathrm{k}_2 r_1 r_2) + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2 r_3 + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2 r_2 + \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2 r_1,$$

и соответствует числителю (23), а Q рассматривается в приложении в точкам В и С.

Таким образом, дуальные механические цепи, как структурные интерпретации соответствующих колебательных систем обладают определенными возможностями в задачах динамического синтеза. Однако, развитие методов динамического синтеза требует предварительных знаний об особенностях построения переходной расчетной схемы, что связано с неоднозначностью решения обратных задач. При использовании структурных интерпретаций в виде эквивалентных САУ, отметим их большую универсальность и возможности развития структур за счет введения дополнительных связей с учетом их физической реализации, тогда как дуальные механические цепи используют лишь одну из комбинаций параметров динамического состояния и внешних возмущений [6].

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Дружинский И.А. Механические цепи. Ленинград. «Машиностроение» ленинградское отделение. 1977. 239с.
2. 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. Вып. 2(10) ИрГУПС. Иркутск. 2006. С. 6-18.
3. Драч М.А., Логунов А.С. Структурные подходы в динамике крутильных колебательных систем// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Вып. 2(10) ИрГУПС. Иркутск. 2006. С. 30-41.
4. Елисеев С.В. Импедансные методы в исследованиях механических систем (основы теории). ИПИ. Иркутск. 1979. 90с.
5. Насников Д.А., Логунов А.С. Типовые звенья в структурных интерпретациях механических колебательных систем// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Вып. 4(12) ИрГУПС. Иркутск. 2007. С. 78-93.
6. Шаталов А.С. Структурные методы в теории управления и электроавтоматики. М.-Госэнергоиздат. 1962. 408с.
7. Елисеев С.В. Структурная теория виброзащитных систем. Новосибирск. Наука. 1978. 232с.

Табл. 1

Частные виды выражений для полного комплексного сопротивления механической цепи.

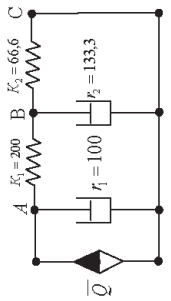
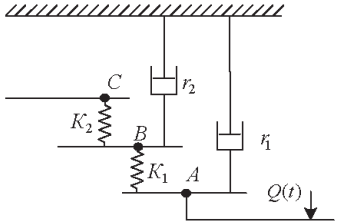
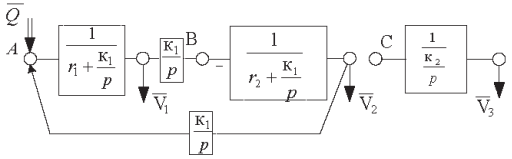
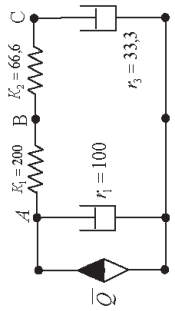
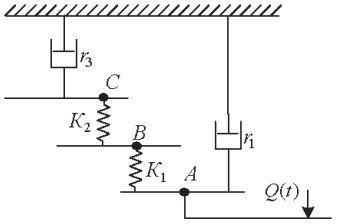
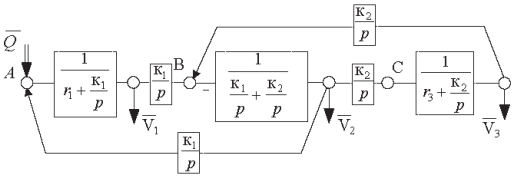
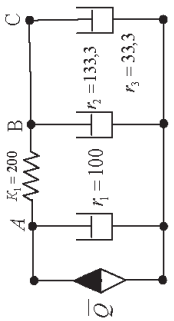
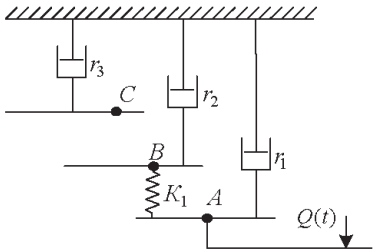
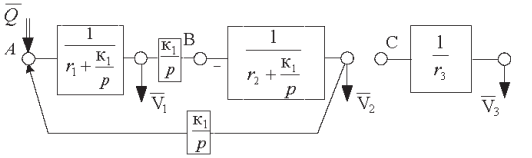
Варианты	Схема	Физическая реализация	Структурная интерпретация	Примечание
1	2	3	4	5
$k_1 \neq 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 = 0$				Элемент k_2 работает в автономном режиме и не передает входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи будет определяться по формуле $S_p = \frac{r_1 \cdot r_2 + r_1 \cdot k_1 + k_1 \cdot r_2}{k_1 + r_2}$
$k_1 \neq 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 = 0$ $r_3 \neq 0$				Все элементы цепи передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи определяется по формуле $S_p = \frac{r_1 \cdot k_1 \cdot k_2 + r_1 \cdot k_1 \cdot r_3 + r_1 \cdot k_2 \cdot r_3 + k_1 \cdot k_2 \cdot r_3}{k_1 \cdot k_2 + k_1 \cdot r_3 + k_2 \cdot r_3}$
$k_1 \neq 0$ $k_2 = 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 \neq 0$				Элемент r_3 работает автономно и не передает входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи определяется по формуле $S_p = \frac{r_1 \cdot k_1 + r_1 \cdot r_2 + k_1 \cdot r_2}{k_1 + k_2}$

Табл. 1 (продолжение)

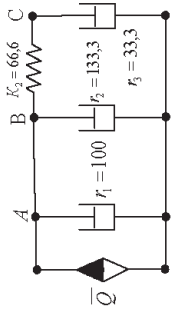
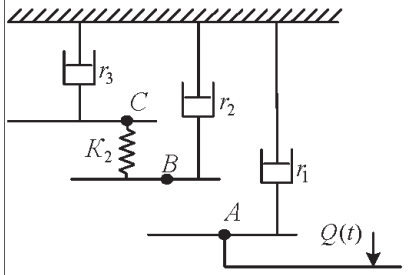
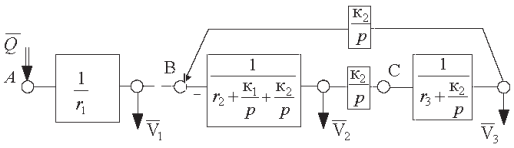
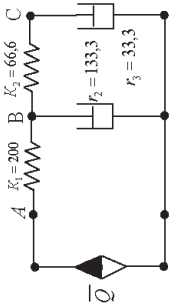
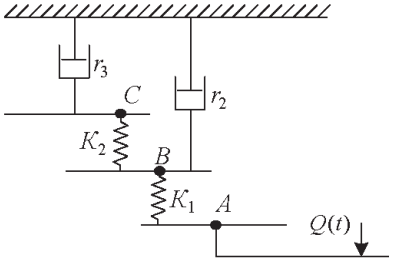
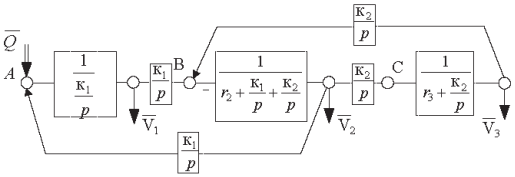
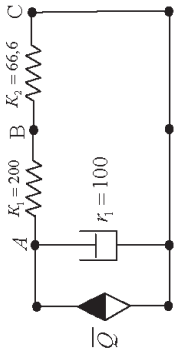
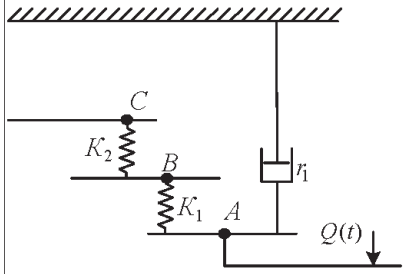
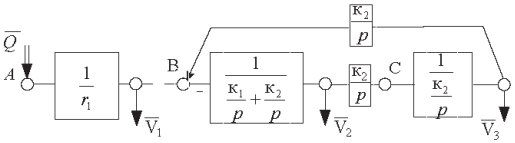
1	2	3	4	5
$k_1 = 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 \neq 0$				Элементы r_3, r_2, k_2 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей входное усилие, определяется $S_p = r_1$.
$k_1 \neq 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 = 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 \neq 0$				Все элементы цепи передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи определяется по формуле $S_p = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot r_3 + k_1 \cdot r_2 \cdot k_2 + k_1 \cdot r_2 \cdot r_3}{k_2 \cdot r_3 + r_2 \cdot k_2 + r_2 \cdot r_3 + k_1 \cdot k_2 + k_1 \cdot r_3}$
$k_1 \neq 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 = 0$ $r_3 = 0$				Элементы k_1, k_2 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей входное усилие, определяется $S_p = r_1$.

Табл. 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
$k_1 \neq 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 = 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 = 0$				Элемент k_2 работает в автономном режиме и не передает входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи определяется по формуле $S_p = \frac{k_1 \cdot r_2}{k_1 + r_2}$
$k_1 \neq 0$ $k_2 = 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 = 0$				Все элементы цепи передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи определяется по формуле $S_p = \frac{k_1 \cdot r_1 + r_1 \cdot r_2 + k_1 \cdot r_2}{k_1 + r_2}$
$k_1 = 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 = 0$				Элементы r_2, k_2 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей усилие, определяется по формуле $S_э = r_1$.

Табл. 1 (продолжение)

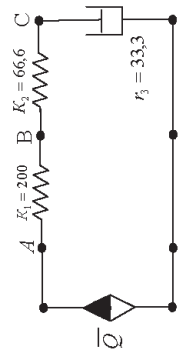
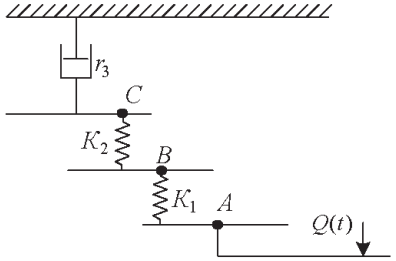
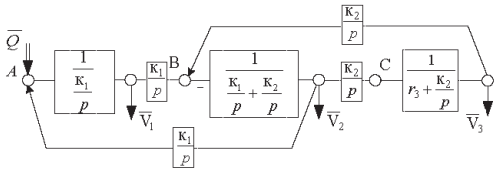
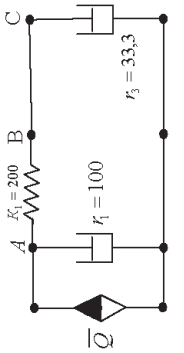
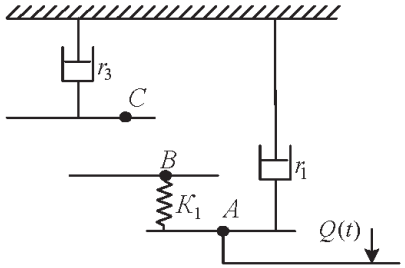
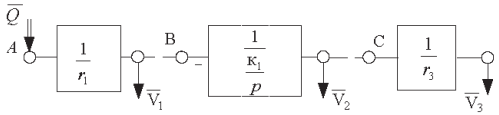
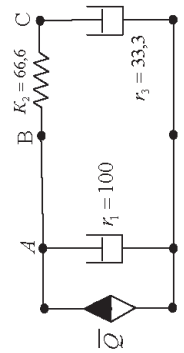
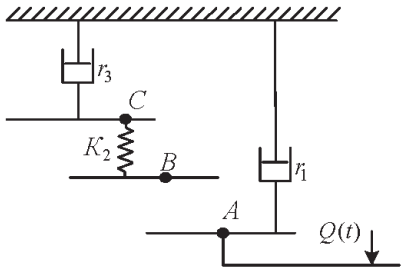
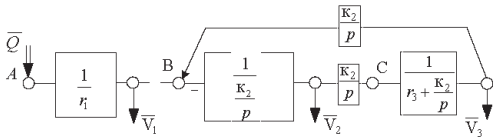
1	2	3	4	5
$k_1 \neq 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 = 0$ $r_2 = 0$ $r_3 \neq 0$				Все элементы цепи передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи определяется по формуле $S_p = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot r_3}{k_1 \cdot k_2 + k_1 \cdot r_3 + k_2 \cdot r_3}$
$k_1 \neq 0$ $k_2 = 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 = 0$ $r_3 \neq 0$				Элементы r_3, k_1 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей усилие, определяется по формуле $S_э = r_1$.
$k_1 = 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 = 0$ $r_3 \neq 0$				Элементы r_3, k_2 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей усилие, определяется по формуле $S_э = r_1$.

Табл. 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
$k_1 \neq 0$ $k_2 = 0$ $r_1 = 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 \neq 0$				Элемент r_3 работает автономно и не передает входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи определяется по формуле $S_p = \frac{k_1 \cdot r_2}{k_1 + r_2}$
$k_1 = 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 = 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 \neq 0$				Элементы r_3, r_2, k_2 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Физическая реализация подобной схемы не рациональна, т.к. входное усилие не будет передаваться ни одним элементом цепи.
$k_1 = 0$ $k_2 = 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 \neq 0$				Элементы r_3, r_2, k_2 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей усилие, определяется по формуле $S_э = r_1$.

Табл. 1 (продолжение)

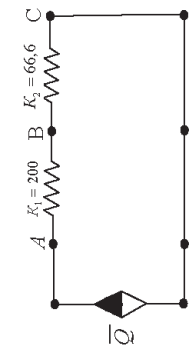
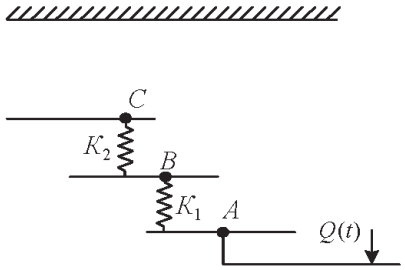
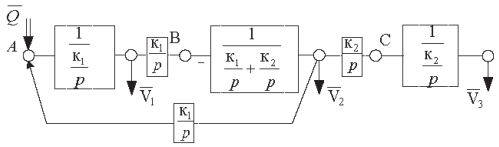
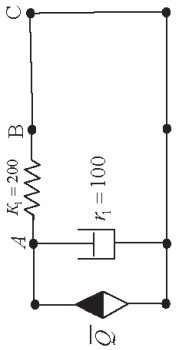
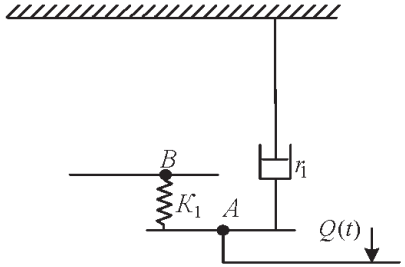
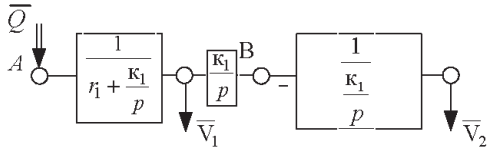
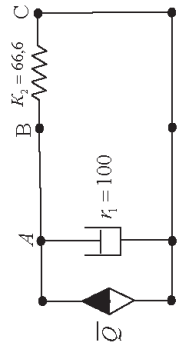
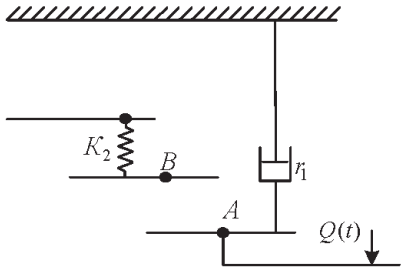
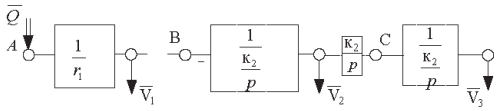
1	2	3	4	5
$k_1 \neq 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 = 0$ $r_2 = 0$ $r_3 = 0$				Все элементы цепи передают входное усилие $Q(t)$. Однако физическая реализация данной схемы не имеет смысла.
$k_1 \neq 0$ $k_2 = 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 = 0$ $r_3 = 0$				Элемент k_1 работает в автономном режиме и не передает входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей усилие, определяется по формуле $S_э = r_1$.
$k_1 = 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 = 0$ $r_3 = 0$				Элемент k_2 работает в автономном режиме и не передает входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей усилие, определяется по формуле $S_э = r_1$.

Табл. 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
$k_1 \neq 0$ $k_2 = 0$ $r_1 = 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 = 0$				Все элементы цепи передают входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи определяется по формуле $S_p = \frac{k_1 \cdot r_2}{k_1 + r_2}$
$k_1 = 0$ $k_2 \neq 0$ $r_1 = 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 = 0$				Элементы r_2, k_2 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Физическая реализация подобной схемы не рациональна, т.к. входное усилие не будет передаваться ни одним элементом цепи
$k_1 = 0$ $k_2 = 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 = 0$				Элемент r_2 работает автономно и не передает входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей усилие, определяется по формуле $S_э = r_1$.

Табл. 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
$k_1 \neq 0$ $k_2 = 0$ $r_1 = 0$ $r_2 = 0$ $r_3 \neq 0$				Элемент r_3 работает автономно и не передает входное усилие $Q(t)$. Физическая реализация данной схемы не имеет смысла.
$k_1 = 0$ $k_2 = 0$ $r_1 \neq 0$ $r_2 = 0$ $r_3 \neq 0$				Элемент r_3 работает автономно и не передает входное усилие $Q(t)$. Комплексное сопротивление цепи, передающей усилие, определяется по формуле $S_э = r_1$.
$k_1 = 0$ $k_2 = 0$ $r_1 = 0$ $r_2 \neq 0$ $r_3 \neq 0$				Элементы r_3, r_2 работают автономно и не передают входное усилие $Q(t)$. Физическая реализация данной схемы не имеет смысла.

Быкова Н.М., Зайнагабдинов Д.А.

УДК 693.546.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК С УЧЕТОМ ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Условия работы подземного сооружения во время эксплуатации определяются, в первую очередь, характером работы горного массива. В однородных сухих скальных грунтах тоннель может находиться в удовлетворительном состоянии десятки, а тои сотни лет. Совсем другая картина наблюдается в подземных сооружениях, эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях. Состояние горного массива зависит от изменения: тектонических полей напряжений, гидрогеологического режима, физико-механических характеристик горных пород, разломной тектоники. В соответствие со СНиП 32-04-97 «Тоннели железнодорожные и автодорожные» при проектировании трасс следует избегать расположения тоннелей в зонах тектонических разломов, оползневых участках, в местах повышенного водосбора, в карстоопасных участках. СНиП II - 7-81* «Строительство в сейсмических районах» также рекомендует при выборе трассы тоннельного перехода предусматривать заложение тоннеля вне зон тектонических разломов, а для участков пересечения тоннелем тектонических разломов, по которым возможна подвижка массива горных пород, при соответствующем технико-экономическом обосновании предусматривать увеличение сечения тоннеля.

Для создания такого технико-экономического обоснования необходимы технологии расчета тоннельных обделок, предусматривающие учет дополнительных геодеформационных воздействий на обделку, вызванных подвижками зон разломов в период эксплуатации тоннеля. Отсутствие таких технологий связано, прежде всего, с трудностью оценки таковых подвижек на стадии изысканий и проектирования подземных сооружений. В то же время, при эксплуатации тоннелей регистрируются развитие повреждений и трещин в приразломных зонах. В отличие от энергоемкой сейсмогеодинамики, геоморфологические процессы в деформационном плане за период срока службы подземного сооружения проявляются медленно, измеряются миллиметрами и сантиметрами. Конструктивно защитить сооружения от таких воздействий можно. Для этого следует рассчитывать подземные сооружения на возможные вертикальные и горизонтальные смещения горных пород в зонах разломов. Направление и количественные параметры смещений геоблоков по разломам оценивают при геодинамическом районировании дорожных трасс с использованием инструментально-измерительных методов, а также, анализа повреждений длительно эксплуатируемых других инженерных сооружений, расположенных на территории проектируемого тоннеля.

Продольная ось подземного сооружения, являясь частью основной дорожной трассы, может иметь различную ориентацию при пересечении горных массивов. Движение горных блоков любого направления относительно положения дорожной трассы раскладывается на векторные составляющие по горизонтали и вертикали. Наиболее сложными местами являются границы тектонических блоковых структур, имеющих разнонаправленные тектонические движения. Эти границы можно назвать сопряжениями. Часть этих границ известна, как разломы. В любом случае, это - тектонические нарушения, являющиеся наиболее подвижной частью горных структур. Под действием механики движения блоков,

физико-химических явлений, связанных с воздействием минералогического состава подземных вод, в горных массивах развиваются деструктивные процессы, результатом которых являются изменение свойств грунтов и развитие трещин в породах. Скорость протекания таких процессов на разных территориях различна, от максимальной в регионах с высокой геодинамикой, сопровождаемой и сейсмическими событиями, до минимальной - в тектонически спокойных регионах. Насколько и как проявляются эти процессы в горном массиве, в котором проектируется тоннель, может показать геодинамическое районирование дорожных трасс.

В период эксплуатации тоннельная конструкция становится частью этого массива и принимает на себя дополнительные напряжения. Условия работы тоннельной обделки в течение всего срока службы должны быть учтены на стадии проектирования. Поскольку наиболее опасными являются зоны разломов, рассмотрим три наиболее вероятных случая расположения тоннеля в этих зонах (рис.1):

-тоннель проходит вдоль разлома типа сдвига и испытывает горизонтальные продольные деформации (рис. 1,а,б);

-тоннель пересекает зону разлома типа сдвига и испытывает поперечное горизонтальное воздействие (рис. 1,в);

-тоннель пересекает зону разлома типа сброса - взброса и испытывает вертикальные деформационные воздействия (рис. 1,г,д).

Горизонтальное продольное деформационное воздействие возникает в случае расположения тоннеля вдоль зоны разлома типа сдвига, когда одно крыло разлома смещается относительно другого по горизонтали вдоль линии простирания (рис. 1,а,б).

Расчетную модель тоннеля можно представить в виде стержня, защемленного с одного портала и загруженного деформационным воздействием с другого на величину перемещений u (рис. 1,а). Если тоннель пересекает поперечный разлом, то в качестве расчетной схемы следует рассматривать участок тоннеля с защемлением в месте его пересечения (рис. 1,б). Величину перемещения u следует определять с учетом срока службы сооружения.

Горизонтальное поперечное деформационное воздействие может наблюдаться в случае пересечения тоннелем разлома типа сдвига, когда одно крыло разлома сдвигается относительно другого в горизонтальном поперечном направлении (рис. 1,в). В этом случае расчетная модель тоннеля должна быть подвергнута поперечному горизонтальному деформационному воздействию на всю высоту модели по эпюре, показанной на рис. 1,в.

Длина воздействия определится шириной зоны разлома и длиной до портала или до границы другого поперечного разлома.

Вертикальное поперечное деформационное воздействие может наблюдаться в случае пересечения тоннелем разлома типа сброса-взброса, когда происходит смещение одного крыла относительно другого вверх или вниз (рис. 1, г,д).

В этом случае расчетная модель тоннеля должна быть подвергнута вертикальному деформационному воздействию — перемещению u с соответствующим знаком со стороны основания на всю ширину модели по эпюре, показанной на рисунках. Длина воздействия определится шириной зоны разлома и длиной до портала или до границы другого поперечного разлома. В общем случае следует учитывать горизонтальную проекцию смещения.

Для математического моделирования в настоящее время существует много пакетов программно-вычислительных комплексов, из которых был выбран PLAXIS 3D TUNNEL[1], предназначенный для анализа методом конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния системы грунтовое основание — сооружение при проектировании тоннелей и других строительных конструкций, как трехмерных пространственных объектов. Главными преимуществами ПВК PAXIS 3D TUNNEL являются: возможность учитывать пять моделей грунтов, и расчет тоннеля в различных взаимо зависимых стадиях работы.

В качестве модели рассмотрен участок IV зоны Северо - Муйского железнодорожного

[1]Авторами программы являются Дельфтский технологический университет и кампания PLAXIS B.V., Нидерланды. Лицензионный пакет был приобретен Иркутским государственным университетом путей сообщения в 2005 г.

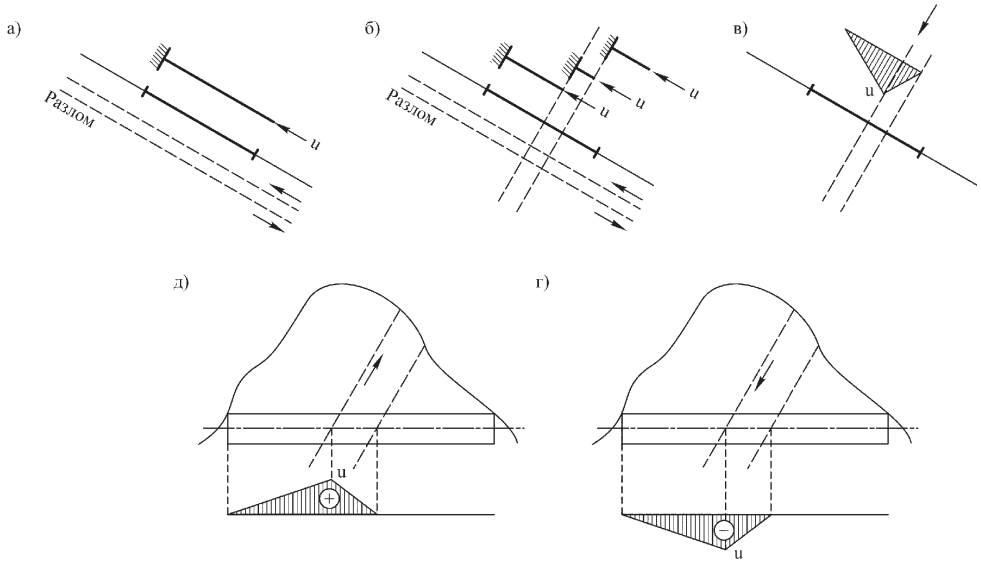


Рис.1. Схемы пересечения тоннелем зон разломов: а) сдвиг вдоль тоннеля без поперечных разломов (план); б) то же, с поперечным разломом (план); в) поперечный сдвиг на плане тоннеля; г) пересечение разломом типа взброса (профиль); д) пересечение разлома типа сброса(профиль).

тоннеля. Целью моделирования является выявление закономерностей напряженно-деформированного состояния в результате проявления разломной геодинамики в виде геодеформационных воздействий, поэтому в модели рассмотрена обделка постоянного сечения.

Геометрия модели. Обделка принята в модели подковообразного сечения под габарит «С» с нижней горизонтальной плитой под путевой бетон, шпалы и рельсы. Высота тоннеля 8,7 м, ширина - 6,6 м. Толщина обделки 30 см, в нижней части 80 см, путевого бетона 50 см. Вместе с обделкой в модель входит часть горного массива, ограниченная размерами в сечении 100*100 м (рис. 2,а). Длина модели составляет 2000 м, причем средняя часть 900 м представляет собой зону разлома, заполненную дробленным перетертым до песчано-глинистого состояния грунтом № 2, крайние части модели представлены крепкими гранитами – грунт № 1 (рис. 2,б).

Характеристика материалов. Математическая модель материалов для исследования закономерностей изменения НДС в стабильных эксплуатационных условиях в результате геодеформационных воздействий принята Linear elastic. Бетон обделки взят класса В30: $\rho = 25$ кН/м^3, $E = 3{,}24 \times 10^{-7}$ МПа, $\nu = 0{,}2$. Бетон путевой - класса В15: $\rho = 25$ кН/м^3, $E = 2{,}7 \times 10^{-7}$ МПа, $\nu = 0{,}2$. Данные грунтов: Грунт № 1 - гранит: плотность $\rho = 26{,}6$ кН/м^3, модуль упругости $E = 4{,}1 \times 10^{-7}$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}24$. Грунт зоны разлома № 2: $\rho = 25{,}6$ кН/м^3, $E = 1{,}1 \times 10^{-7}$ МПа, $\nu = 0{,}3$.

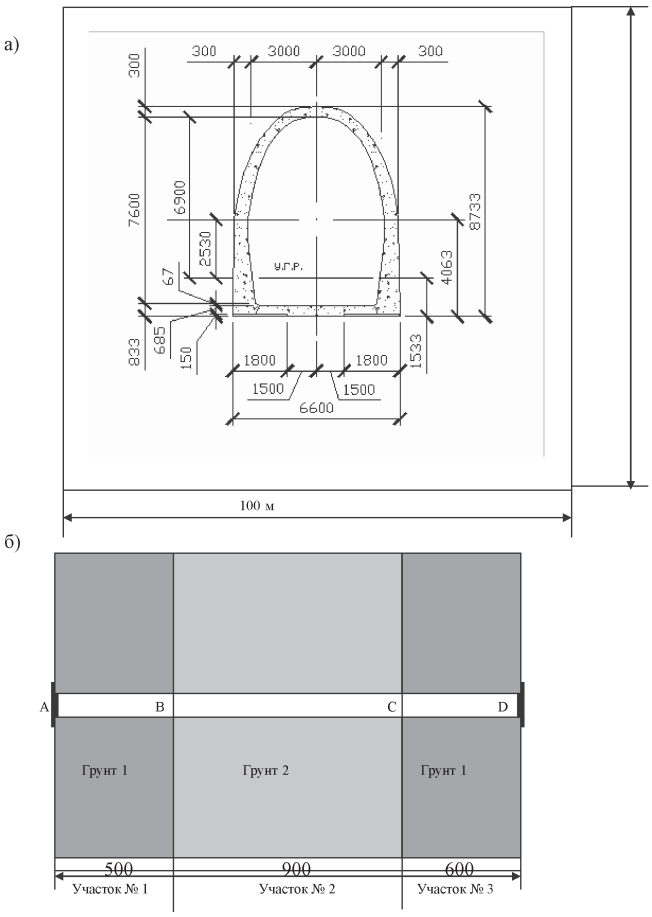


Рис.2 Геометрическая схема модели: а) - сечение модели; б) – план модели (А,В,С,Д – вертикальные плоскости).

Схемы нагружения. Рассмотрены два варианта с максимально невыгодным нагружением: 1) максимальное горное давление 2) минимальное горное давление - с передачей основной нагрузки на начальную бетонную крепь — «черновой» бетон, основная обделка при этом на горное давление не загружена.

Нагрузка на модель от всего горного массива (вариант 1) прикладывается в виде наиболее невыгодной неравномерно распределенной нагрузки от максимальной 22500 кН/м^2 до 7500 кН/м^2 (рис. 3).

Величина геодеформационных воздействий задавалась по данным геодезического мониторинга положения реперов над Северо-Муйским тоннелем и принята равной в пределах 50 мм. К сожалению, геодезические наблюдения проводились периодически (1974-1979 г.г., 1984-1990 г.г.), сложно оценить степень накопленных и возвратных смещений и, тем более, остаточную величину смещений за период строительства тоннеля. К тому же, грунтовая среда перераспределяет напряженно-деформированное состояние, возникшее в результате геодеформационных воздействий. В связи с этим акцент сделан на выявление закономерностей изменения напряжений.

Рассмотрены следующие схемы геодеформационных воздействий (рис. 3):

схема № 1 — гравитационная нагрузка от максимального горного давления (рис. 3,а);

схема № 1а — минимальная гравитационная нагрузка от собственного веса модели без учета веса горного массива;

схемы № 2, 3 — максимальное горное давление и смещение горного массива вдоль оси Z - 50 мм (рис.6.3,б), и +50 мм (рис. 3,в);

схемы № 4, 5 — максимальное горное давление и смещение одного крыла разлома вверх по оси Y на +50 мм (рис.3,г), вниз по оси Y на -50 мм (рис. 3,е);

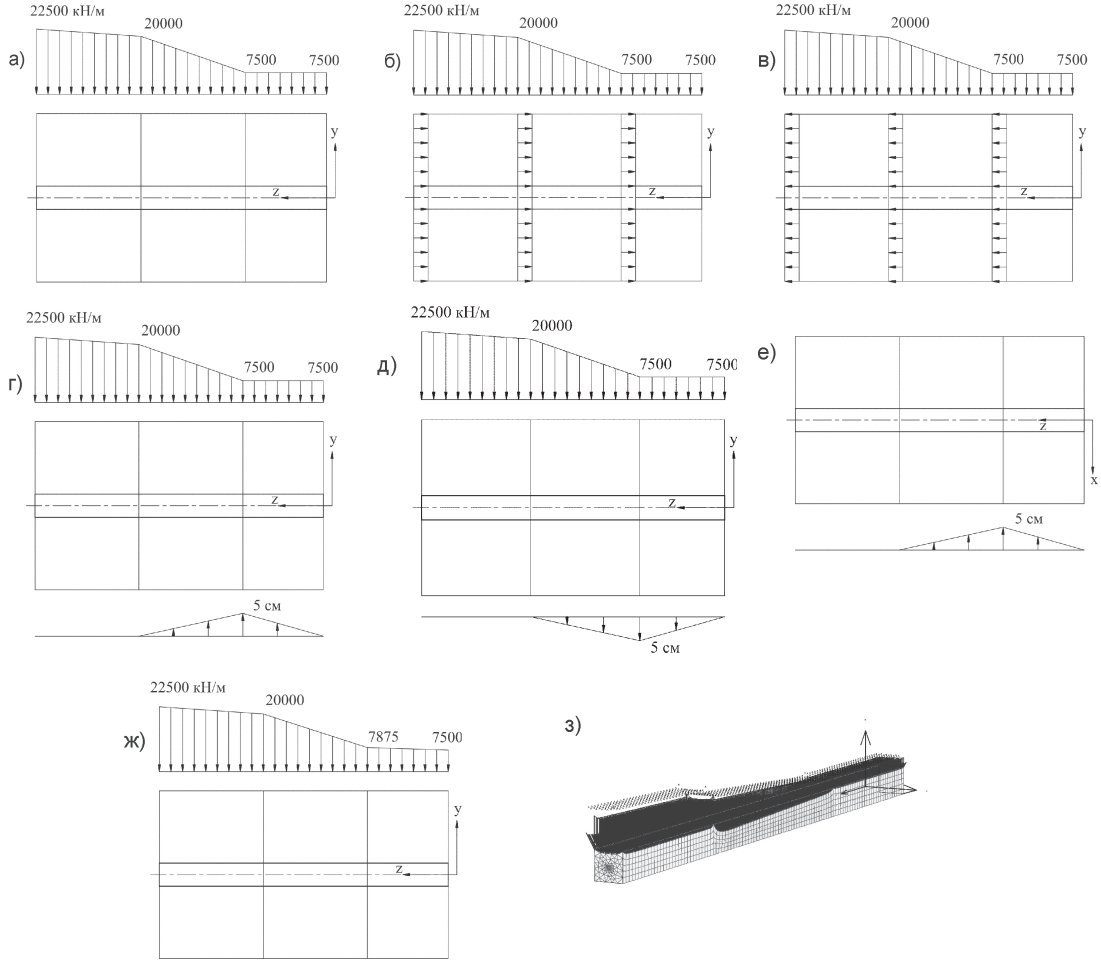


Рис.3. Схемы нагружения модели: а)- нагрузка; б) – нагрузка и смещение вдоль тоннеля на – 5 см; в) нагрузка и смещение вдоль тоннеля на +5 см; г) нагрузка и смещение по вертикали вверх на +5 см; д) нагрузка и смещение по вертикали вниз на -5 см; е) нагрузка и смещение по горизонтали на 5 см; ж) нагрузка и пригруз на 5%.

схема № 6 — максимальное горное давление и горизонтальное поперечное смещение одной стороны разлома по оси X на -50 мм (рис. 3,е);

схема № 7 — максимальное горное давление и локальный пригруз нагрузки на 5% (рис. 3.ж), схема моделирует возможное локальное увеличение нагрузки на 5% во время землетрясений. На рис. 3,з показано изображение модели с нагрузкой в программе PLAXIS 3D TUNNEL.

Результаты моделирования. Анализ результатов моделирования выполнен сравнением максимальных напряжений σ_x σ_y σ_z τ_{xy} τ_{yz} τ_{xz}. Рассматривались поперечные сечения посередине участков № 1, №2, № 3 и на границах разлома — в зоне расположения плоскостей B и C. Примеры напряженно — деформированного состояния модели представлены графическими изображениями. Для наглядности деформации увеличены в 250 раз.

В таблице 1 приведены напряжения по точкам сечения, в которых расчетом определены максимальные значения напряжений по схеме № 1.

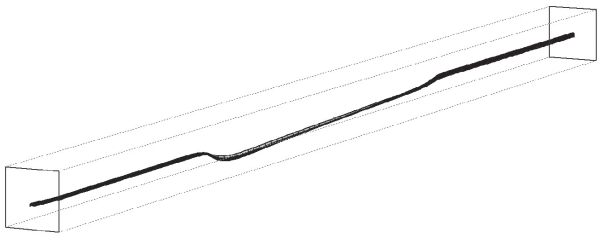


Рис. 4. Деформируемый вид тоннеля (увеличение в 250 раз).

С х е м а № 1. Гравитационная нагрузка от горного массива приложена неоднородно в соответствие с рельефом; модель разделена на три участка. На первый участок приходится максимальная нагрузка, на третий — минимальная. Второй участок зоны разлома представлен более деформативными грунтами (грунт № 2) и имеет неравномерную нагрузку; соответственно это отразилось на деформированном виде модели (рис. 4). Распределение напряжений в отдельных сечениях приведены на рис. 5 - 9.

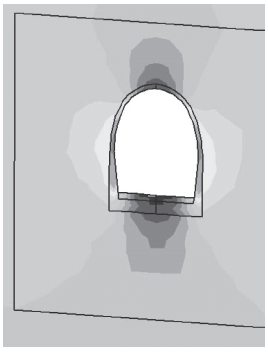


Рис. 5. Напряжения y_y в плоскости C .

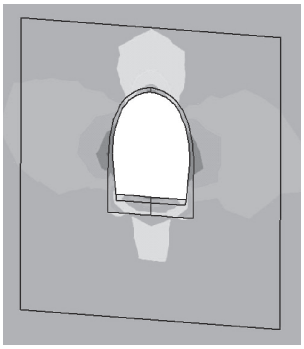


Рис. 6. Напряжения y_x в плоскости C .

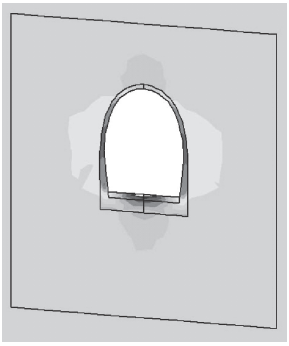


Рис.7. Напряжения y_z сер.2 уч. (макс. -13 МПа).

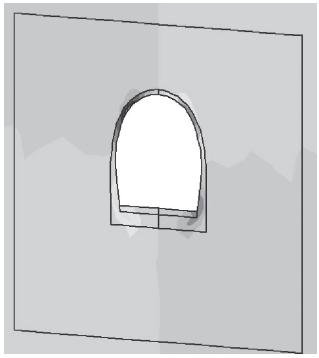


Рис.8 Схема 1 Напряжения $ф_{xy}$ сер. 2 уч. (макс. 24 МПа).

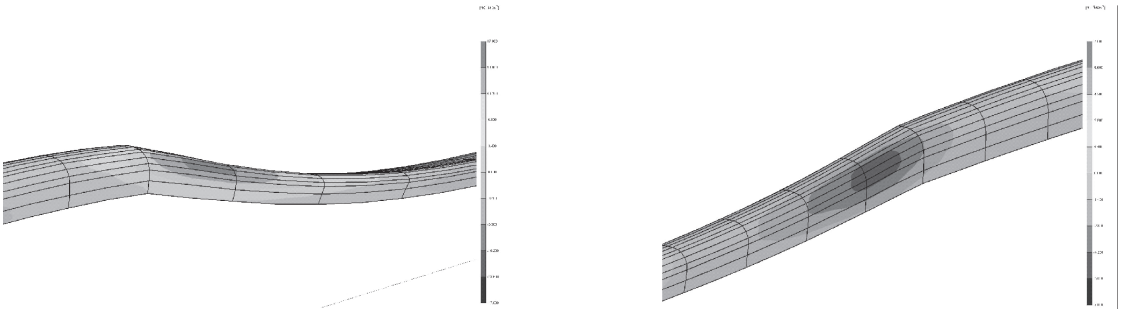


Рис.9 Схема 1. Напряжения τ_{yz} в плоскости B и C (максимальные значения 17 МПа в плоскости B, 7 МПа в плоскости C).

Табл. 1

Максимальные напряжения в сечениях при различных схемах нагружения.

Схема нагружения	Участок	Максимальные напряжения в МПа					
		y_y	y_x	y_z	$ф_{xy}$	$ф_{yz}$	$ф_{zx}$
№ 1 — Нагрузка от горного давления на обделку	№ 1	-33,6	-14,4	-8,5	-11,5	0.2	-0.1
	№ 2 плоск. В	-45,4	-19,1	-11,0	-15,0	2,7	2,3
	№ 2 середина	-58,8	-22,5	-12,6	24,2	-1,2	0.5
	№ 2 плоск. С	-18,8	-8,7	-5,5	6,5	-1.6	0.8
	№ 3	-13,3	-6,2	-4,0	4,7	0	0
№ 2 — Нагрузка и смещение вдоль тоннеля по Z -5 см	№ 1	-33,3	-14,0	-7,6	-11,4	-1,4	-0.8
	№ 2 плоск. В	-46,5	-19,1	-10,3	-15,4	-0,5	0,1
	№ 2 середина	-58,8	-22,5	-12,6	24,3	-1,5	0.6
	№ 2 плоск. С	-17,4	-8,9	-5,96	6,2	-5,1	3,9
	№ 3	-13,5	-6,4	-4,4	4,8	-0,2	0
№ 3 — Нагрузка и смещение вдоль по Z на + 5 см	№ 1	-33,9	-14,9	-9,3	-11,7	0.9	0.5
	№ 2 плоск. В	-43,8	-19,1	-11,6	-14,8	5,8	-4,7
	№ 2 середина	-58,8	-22,5	-12.6	24,2	-0.9	0.4
	№ 2 плоск. С	-20,2	-8,7	-4,9	6,8	2,5	-2,1
	№ 3	-13,2	-5,9	-3,4	4,6	0.4	0
№ 4 — Нагрузка и вертикальное смещение вверх на +10 см	№ 1	-33,6	-14,4	-8,5	-11,6	-0.2	-0.1
	№ 2 плоск. В	-44,9	-19,1	-11,1	-15,1	2,6	-2,3
	№ 2 середина	-58,8	-22,5	-12,6	24,2	-1,2	0.5
	№ 2 плоск. С	-19,6	-8,8	-5,0	6,7	-1,8	0,8
	№ 3	-13,3	-6,3	-4,0	4,7	0.11	0
№ 5 — Нагрузка и вертикальное смещение вниз на -10 см	№ 1	-33,6	-14,4	-8,5	-11,5	-0,3	-0,2
	№ 2 плоск. В	-45,3	-19,1	-10,7	-15,2	2,7	-2,3
	№ 2 середина	-58,8	-22,5	-12,6	24,2	-1,2	0,5
	№ 2 плоск. С	-18,1	-8,7	-5,9	6,3	-1,5	0,9
	№ 3	-13,3	-6,2	-3,9	4,7	-0,1	0
№ 6 — Нагрузка и горизонтальное смещение на -10 см	№ 1	-33,6	-14,4	-8,5	-11,5	-0,1	-0,1
	№ 2 плоск. В	-32,3	-11,2	-7,6	-10,2	1,6	-1,6
	№ 2 середина	-41,5	-9,9	-9,1	15,2	2,3	0,8
	№ 2 плоск. С	-8,4	0,2	-2,8	1,5	-1,4	0,1
	№ 3	-6,9	-1,0	-1,9	1,7	-1,0	0,1
№ 7 — Нагрузка и пригруз на 5%	№ 1	-33,6	-14,4	-8,5	-11,5	-0.2	-0.1
	№ 2 плоск. В	-45,2	-19,1	-11,0	-15,1	2,7	2,3
	№ 2 середина	-59,5	-22,8	-12,7	24,5	-1.2	0.5
	№ 2 плоск. С	-19,3	-8,9	-5,9	6,6	-1,8	0,9
	№ 3	-13.3	-6,2	-4,0	4,7	0	0

Наибольшие сжимающие вертикальные напряжения σ_y расположены в стенах, наименьшие — вверху и внизу сечения. По длине модели вертикальные напряжения σ_y в середине первого участка равны -33,6 МПа, в плоскости В — -45,4 МПа, в плоскости С -18,8 МПа, в середине третьего участка — -13,3 МПа.

Максимальные напряжения σ_y по расчету определились не в месте приложения максимальной нагрузки, а в месте максимальной деформируемости - в середине второго участка -58,8 МПа. Напряжения σ_x также меняются по длине в зависимости от нагрузки и характеристик грунтов, составляя соответствующие величины по участкам 14,4; 19,1; 8,7; 6,2 МПа, соответственно, и максимальные значения в середине второго участка -22,5 МПа.

В связи с неравномерным приложением по длине тоннеля горного давления, различием деформативных свойств грунтов и эффектом Пуассона возникают продольные напряжения σ_z, которые составили по центру участков соответственно -8,5; - 12,6; - 4,0 МПа. В поперечном сечении максимальные напряжения σ_z находятся в области стен, на границах 2-го участка в область продольных сжимающих напряжений попадает нижняя часть обделки (рис. 7).

На уровне путевого бетона расчетом получены вертикальные напряжения σ_y, направленные вверх, горизонтальные растягивающие напряжения σ_x, поэтому конструктивная связь между путевым бетоном и бетоном обратного свода в условиях влияния поездной динамики требует особой проработки при проектировании.

Максимальные касательные напряжения τxy в середине 1, 2 и 3 участков имеют значения τxy = 11,5; 24,2; и 4,7 МПа, соответственно. Напряжения τ_{yz} и τ_{xz} , за исключением граничных участков зоны разлома имеют низкие значения — 1,2 МПа и менее. Однако на границе грунтов с различными свойствами образуются локальные зоны повышенных касательных напряжений τ_{yz} (рис. 9) τ_{zx}.

С х е м а № 1а. Горизонтальные и вертикальные напряжения от собственного веса модели без учета давления горного массива достаточно малы (2-3 МПа). Технология возведения обделки СМТ в реальности обеспечила ее работу при малых напряжениях от горного давления.

С х е м ы № 2, 3 включают нагрузку от максимального горного давления и горизонтальное смещение вдоль тоннеля по направлению оси Z ±50 мм (рис.3,в). В ПВК Plaxis 3d Tunnel деформационное воздействие по оси Z вдоль тоннеля или эквивалентная ему горизонтальная нагрузка прикладывается к перпендикулярным плоскостям, ограничивающим отдельные блоки модели. В результате расчета напряжения, не связанные с направлением оси Z - σ_x σ_y τ_{xy}, изменяются незначительно и, напротив, изменяются напряжения, связанные с направлением Z — σ_z τ_{yz} τ_{xz}. Особенно чувствительными являются границы зон грунтов с разными деформативными свойствами — границы зон разломов (рис. 10 - 12).

С х е м ы № 4,5. В этих схемах к нагрузке от горного давления добавлены смещения крыла разлома по вертикали вверх и вниз на ±50 мм (рис.3, г, д). Напряженно - деформированное состояние загруженной модели наиболее устойчиво к вертикальным геодеформационным воздействиям. Направленные вверх (восходящие) движения блока незначительно увеличивают вертикальные напряжения в месте его максимального приложения, направленные вниз (нисходящие) движения, соответственно, уменьшают.

С х е м а № 6. Результаты расчета отражают изменение НДС модели при горизонтальном поперечном смещении крыла разлома (рис.3,е). Такое воздействие оказалось наиболее опасным, так как изменились все компоненты напряжений, на участках № 2 и №3, вовлеченных в деформационный процесс, в большей мере (в 2-3 раза) изменились напряжения σ_x.

С х е м а № 7. Пригруз 5% может возникнуть во время землетрясения. При этом в зоне действия пригруза возрастают вертикальные напряжения σ_y.

Работа обделки при малых напряжениях в условиях передачи горного давления на «черновой» бетон — идеальный вариант для неизменяемых условий эксплуатации. Геодеформационные воздействия за счет смещений блоков по границам разломов вовлекают такую обделку в работу на частичное горное давление. Оценка работы обделки в таких условиях нуждается в проведении экспериментальных исследований.

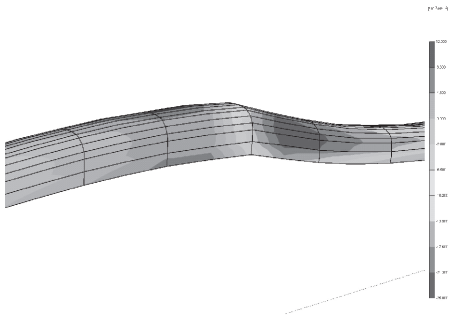


Рис. 10. Схема 2. Напряжения σ_z в районе плоскости В.

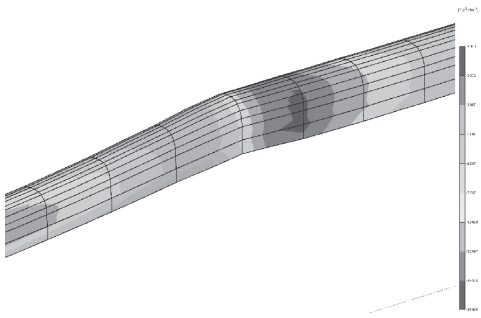


Рис. 11. Схема 2. Напряжения σ_z в районе плоскости С.

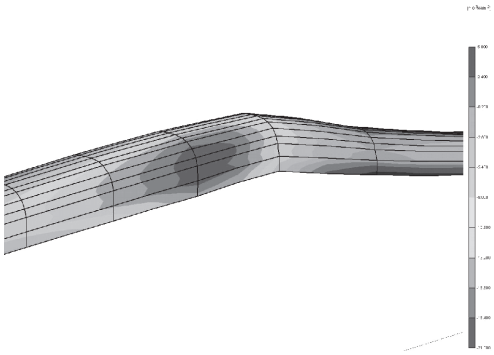


Рис. 12. Схема 3. Напряжения σ_z в районе плоскости В.

Общие выводы.

1. В рамках принятых допущений методом математического моделирования установлено: напряженно - деформированное состояние обделок тоннелей, расположенных в зонах разломов, представляемых более деформируемыми грунтами, зависит от направления и величины проявления геодеформационных воздействий в результате смещений крыльев разломов.

2. Для обделки, полностью воспринимающей горное давление и расположенной в зоне разлома, характерны следующие закономерности распределения НДС:

- максимальные перемещения и напряжения приходятся на середину зоны разлома, особого внимания заслуживают зоны сопряжения крепких и слабых грунтов на протяжении 60-100 м, в которых происходит локальная концентрация напряжений, которые могут стать причиной образования трещин в случае превышения предельных величин для материала обделки;

-горизонтальное смещение горных блоков вдоль тоннеля по направлению оси Z мало изменяет напряжения, не связанные с направлением оси Z - σ_x σ_y τ_{xy} , но существенно изменяет напряжения σ_z, τ_{yz}, τ_{xz} на границах грунтов с разными деформативными свойствами;

-вертикальные смещения горных блоков восходящего характера увеличивают напряжения уу в зоне их приложения, нисходящего характера — уменьшают, в пограничных зонах появляются локальные зоны повышенных касательных напряжений;

-наиболее опасным является горизонтальное смещение поперек продольной оси транспортного сооружения; такое воздействие вызывает резкое увеличение всех компонент напряжений на прилегающих участках, особенно, горизонтальных напряжений σ_x;

-моделирование воздействия пригруза 5% , возможного, например, во время землетрясения, показало пропорциональный рост вертикальных напряжений σ_y в месте его приложения.

3. В случае, когда обделка проектировалась с технологией возведения без учета максимального горного давления, геодеформационные воздействия могут вовлечь ее в работу на дополнительное сопротивление со стороны горного массива. Для изучения работы различных обделок в условиях разломной тектоники необходимо проведение экспериментальных исследований.

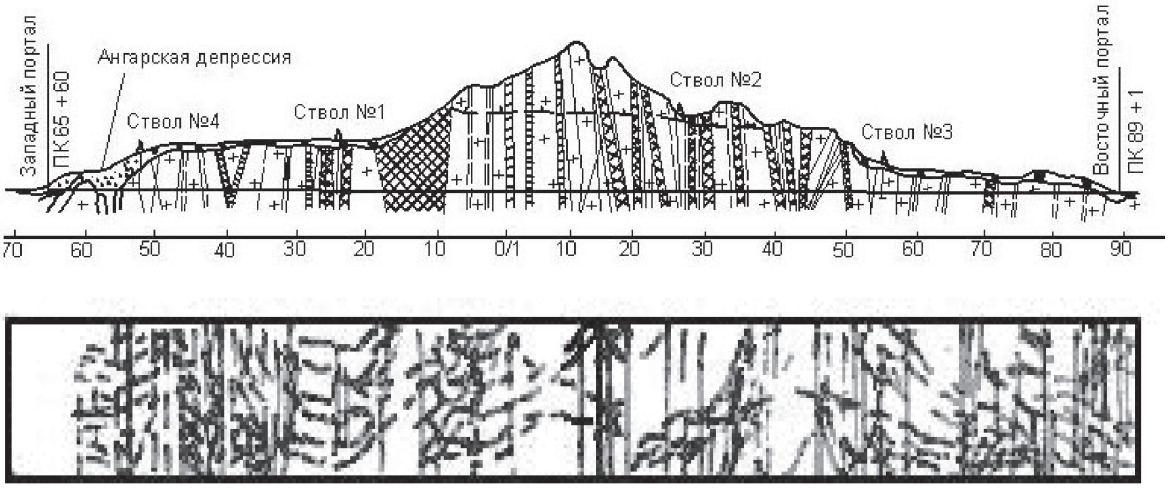


Рис.13. Схема трещин в стенах обделки тоннеля.

Приведенный пример математического моделирования подтверждает необходимость выполнения пространственного расчета участков тоннеля, проверяя все компоненты напряжений с учетом возможных геодеформационных воздействий в результате смещений крыльев разломов. Используя мощные вычислительные ресурсы и программные средства, целесообразно создавать математические модели тоннеля в целом горном массиве с реальными геометрическими и физическими данными и осуществлять конструктивную защиту в соответствие с определяемыми напряжениями. Это может быть дополнительное увеличение толщины обделки, армирование, предварительное напряжение и др. При проектировании обделок для регулирования НДС вдоль тоннеля также предусматриваются деформационные швы, эффект которых зависит от степени геодеформационных воздействий и характера совместной работы грунтов и обделки.

На рис. 13 показана схематичная картина трещин в стенах обделки, полученная при обследовании тоннеля в 2003 г. до проведения их герметизации и ввода тоннеля в эксплуатацию. Сверху показан геологический разрез. Обращает на себя внимание близкая ориентация трещин в стенах тоннелей и траекторий зон дробления блоковой структуры горной перемычки. Хорошо виден расходящийся в обе стороны характер диагональных трещин в районе IV (ПК 20-ПК 10 зап) и III (ПК 40 - ПК 46 вост) тектонических зон. Можно предположить, что такое совпадение свидетельствует о близости закономерностей распределения полей напряжений в горном массиве и тоннельной конструкции в процессе развития деформационных процессов по зонам разломов.

Ситов И.С., Белокобыльский С.В. УДК 693.546.4

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВИБРАЦИОННОГО ЗАГЛАЖИВАНИЯ

В ряде работ, например, [1],[2] рассматривался вопрос о подходах и выборе математической модели заглаживающего станка, в целом, и базовых моделях расчета основных фрагментов конструкции — каретки, несущей рабочие органы, выполненные в виде электромагнитных вибрационных узлов. В связи с тем, что каретка (рис. 1) обладает пространственной метрикой и в области низких частот может рассматриваться как твердое тело, опирающееся на две или четыре упругих «элемента», представляет определенный интерес конкретизировать математическую модель с целью оценки возможностей использования свойств симметрии и возможного динамического уравновешивания сил взаимодействия.

Вибрационная заглаживающая машина может быть спроектирована на базе заглаживающей машины СМР-13 промышленного образца, которая состоит из рамы 1, расположенного на ней подвижного моста 2, на котором установлена передвигающаяся каретка 3. На каретку установлен исследуемый рабочий блок, состоящий из редуктора 4, двух кривошипов 5 и непосредственно бруса 6 с закрепленными на нем электромагнитными вибраторами 7. Насосная станция 8 посредством гибкого трубопровода обеспечивает подачу жидкости к гидромоторам и, тем самым, передвижение моста и каретки. Управление экспериментальной установкой осуществляется с пульта 9. Сам брусовый рабочий орган (рабочий блок с четырьмя вибраторами) представлен на рис. 2 и рис. 3. Сущность изобретения автора [3] поясняется на рис. 2 а, б, на которых изображен брусовый заглаживающий орган.

Устройство состоит из тела бруса 1, электромагнитных вибровозбудителей 2, направляющих 3, в которых могут свободно перемещаться секторы 4 с вибровозбудителями, виброизолирующих элементов и уплотнителей 6, показанных наиболее полно на рис. 4, предотвращающих попадание бетонной смеси к по-

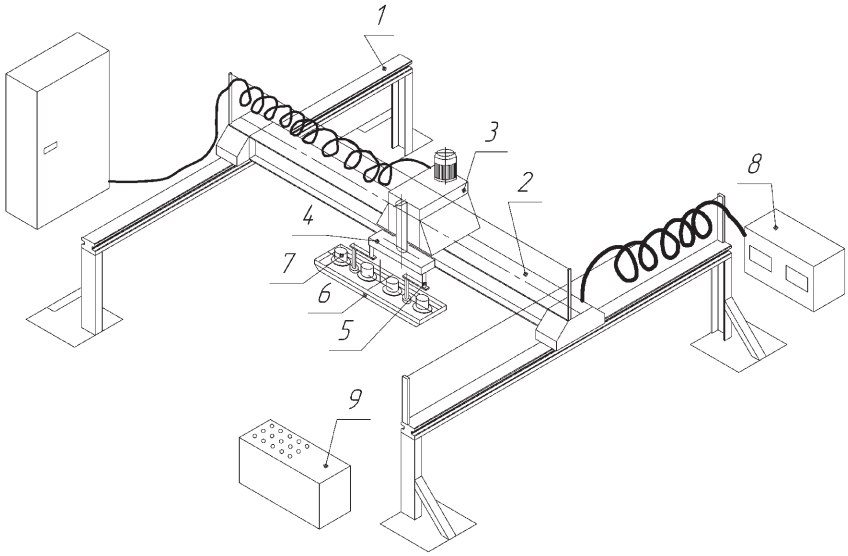


Рис. 1. Экспериментальный стенд. 1 – рама; 2 – подвижный мост; 3 – каретка; 4 – редуктор рабочего органа; 5 – кривошип; 6 – тело бруса; 7 – электромагнитные вибровозбудители; 8 – насосная станция; 9 – пульт управления.

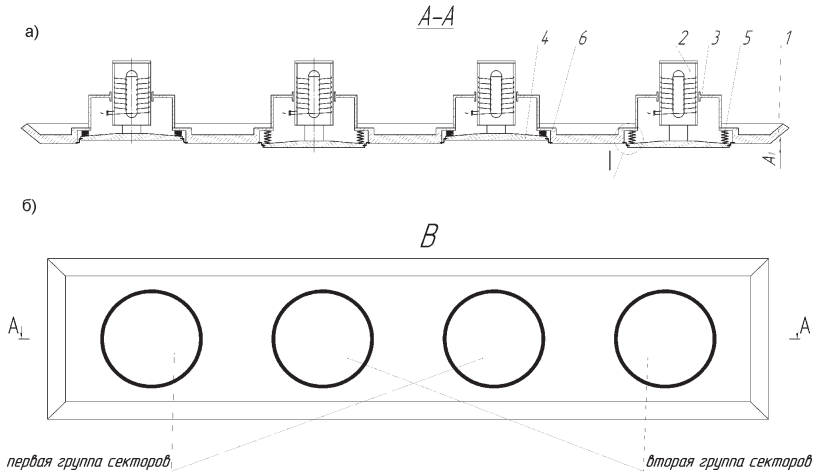


Рис. 2. - Рабочий орган в виде бруса с вибрационными секторами: а – продольный разрез, б – вид сверху.

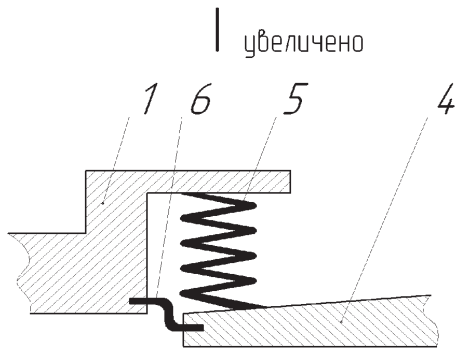


Рис. 3. Схема герметичности контакта.

верхности корпуса вибровозбудителя. На рис. 3 показаны детали конструктивной реализации рабочего органа.

Заглаживающее устройство работает следующим образом: при подаче электрического тока на контакты вибровозбудителей 2, подвижные сектора 4 совершают возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости, при этом, оказывая воздействие на обрабатываемую поверхность, вибровозбудители с телом бруса 1 соединены по средством упругих связей 5 и направляющих 3^0, подключение электромагнитных вибровозбудителей осуществлено попарно, т.е. каждая пара секторов движется навстречу друг другу, тем самым на тело бруса не передается вредное вибрационное воздействие. Преимуществом такой конструкции является существенное снижение металлоемкости и энергоемкости рабочего органа за счет того, что кинематический вибровозбудитель заменен на электромагнитный, позволяющий также существенно повысить интенсивность воздействия секторов на обрабатываемую поверхность

На рис. 4 представлена расчетная схема системы, состоящей из четырех вибрационных устройств. Система вибраторов в отношении конструкции закрепления (каретка) реализует вибрационные силы, которые должны быть равны по величине, работать в фазе и располагаться на равных расстояниях от центра масс. Сдвиг по фазе между силами $P_1 \div P_4$ в силу связности колебания по параллельным системам нежелателен, также как и отклонения в размерах, что было показано при анализе свойств вибрационного поля [4].

Представленная на рис. 4 расчетная схема отражает основные свойства динамического взаимодействия между рабочим органом виброзаглаживающей машины и поверхностью разравниваемой бетонной смеси. Рабочий орган может быть на первом этапе рассмотрения представлен весомой балкой, опирающейся на четыре упругих опоры, имеющие в общем случае различные коэффициенты жесткости $k_i \div k_4$. Электромагнитные устройства, работающие на фиксированной частоте (50 или 100 гц) создают в соответствующих точках (1)÷(4) силовые возмущения гармонического вида. Под действием этих периодических сил система будет совершать колебательные движения относительно положения статического равновесия. Для описания движения системы можно использовать две системы обобщенных координат: перемещение центра масс (М) - y, и поворот относительно центра масс (т.А) балки, имеющей момент инерции I на угол φ. Вторая система обобщенных координат связана с перемещениями y_1 и y_4 в точках приложения сил P_1 и P_4 - точки (1) и (4). Перемещения в точках (2) и (3) y_3 и y_4 могут быть однозначно определены через y_1 и y_4. В целом, система (рис.4) имеет, таким образом, две степени свободы.

Для вывода дифференциальных уравнений движения воспользуемся обобщенным уравнением Лагранжа II рода и определим выражения для кинетической

$$T = \frac{1}{2} M\dot{y}^2 + \frac{1}{2} I\dot{\varphi}^2 \qquad (1)$$

и потенциальной энергий

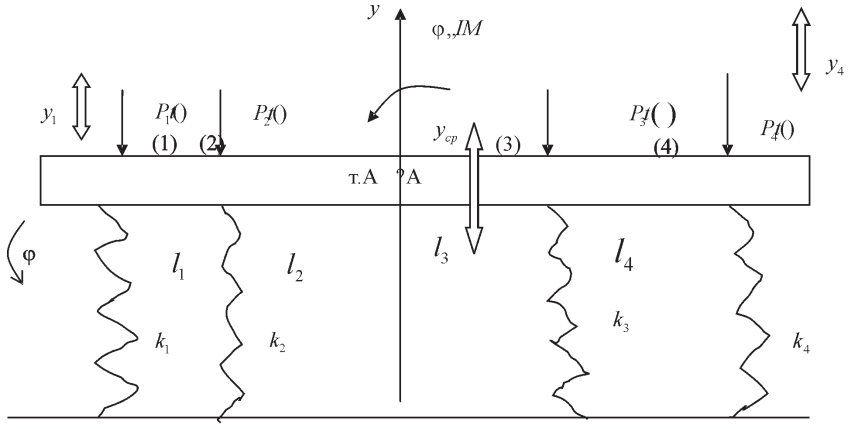


Рис.4. Расчетная схема брусового рабочего органа с электромагнитным приводом:
т. А. – центр масс, I- момент инерции корпуса; М – масса бруса; $P_i(t)$ - силовые вибрационные воздействия;Y, $Y_{ср}$ - координаты смещения центра масс и угол поворота вокруг центра масс, $y_i(t)$ - вертикальные смещения точек корпуса; k_i - коэффициенты жесткости пружин.

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1 y_1^2 + \frac{1}{2}k_2 y_2^2 + \frac{1}{2}k_3 y_3^2 + \frac{1}{2}k_4 y_4^2. \qquad (2)$$

Полагая, что балка (M, I) при колебаниях не деформируется, получим ряд соотношений:

$$y_1 = y - (l_1 + l_2)\varphi,\ y_2 = y - l_2\varphi,$$
$$y_3 = y + l_3\varphi,\ y_4 = y + (l_3 + l_4)\varphi. \qquad (3)$$

В свою очередь:

$$y = \frac{y_4 - y_1}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4} = (y_4 - y_1)\cdot a,$$
$$y = \frac{y_1(l_3 + l_4) + (l_1 + l_2)y_4}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4} \qquad (4)$$

или

$$\varphi = a(y_4 - y_1),\ Y = a_1 y_1 + b_1 y_4, \qquad (5)$$

где $a = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$, $a_1 = \frac{l_3 + l_4}{a}$; $b_1 = \frac{l_1 + l_2}{a}$.

Отметим, что $y_1 \div y_4$ связаны между собой следующими соотношениями

$$y_2 = \frac{y_1(l_2 + l_3 + l_4) + y_4 \cdot l_1}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4},$$
$$y_3 = \frac{y_1 \cdot l_4 + y_4(l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}, \qquad (6)$$
$$\text{или } y_1 = y - d_1\varphi,\quad y_4 = y + d_2\varphi,$$
$$y_2 = y_1 a_2 + y_4 b_2,\quad y_3 = y_1 a_3 + y_4 b_3,$$

где

$$a_2 = \frac{l_2 + l_3 + l_4}{a}, b_2 = \frac{l_1}{a}, a_3 = \frac{l_4}{a}, b_3 = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{a},$$
$$d_1 = l_1 + l_2, d_2 = l_3 + l_4.$$

Преобразуя (2) с учетом полученных соотношений, запишем выражения для потенциальной

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1 y_1^2 + \frac{1}{2}k_2(y_1 a_2 + y_4 b_2)^2 + \frac{1}{2}k_3(y_1 a_3 + y_4 b_3)^2 + \frac{1}{2}k_4 y_4^2 =$$
$$= \frac{1}{2}k_1 y_1^2 + \frac{1}{2}k_2(y_1^2 a_2^2 + 2y_1 y_4 a_2 b_2 + y_4^2 b_2^2)^2 + \frac{1}{2}k_3(y_1^2 a_3^2 + 2y_1 y_4 a_3 b_3 + y_4^2 b_3^2)^2 + \frac{1}{2}k_4 y_4^2 \qquad (7)$$

и кинетической энергий системы

$$T = \frac{1}{2}M(a_1\dot{y}_1 + b_1\dot{y}_4)^2 + \frac{1}{2}I\cdot a^2(\dot{y}_4 - \dot{y}_1)^2 =$$
$$= \frac{1}{2}M(a_1^2\dot{y}_1^2 + 2a_1 b_1\dot{y}_1 y_4 + b_1^2\dot{y}_4^2)^2 + \frac{1}{2}I\cdot a^2(\dot{y}_4^2 - 2\dot{y}_4\dot{y}_1 - \dot{y}_1^2). \qquad (8)$$

Продолжая выкладки, найдем

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = Ma_1^2\cdot\dot{y}_1 + Ma_1 b_1\dot{y}_4 - \\ \quad - Ia^2\cdot\dot{y}_4 + Ia^2\cdot\dot{y}_1; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial y_1} = k_1 y_1 + k_2(y_1 a_2^2 + a_2 b_2 y_4) + \\ \quad + k_3(a_3^2 y_1 + a_3 b_3 y_4); \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_4} = Mb_1^2\cdot\dot{y}_4 + Ma_1 b_1\dot{y}_1 + \\ \quad + Ia^2\cdot\dot{y}_4 - Ia^2\cdot\dot{y}_1; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial y_4} = k_2(a_2^2 b_2 y_1 + b_2^2 y_4) + \\ \quad + k_3(a_3 b_3 y_1 + b_3^2 y_4) + k_4 y_4, \end{cases} \qquad (9)$$

откуда получим, в конечном итоге:

$$\left.\begin{aligned}&\ddot{y}_1\left(Ma_1^2+Ia^2\right)+\ddot{y}_4\left(Ma_1b_1-Ia^2\right)+\\&+y_1\left(k_1+k_2a_2^2+k_3a_3^2\right)+y_4\left(k_2a_2b_2+k_3a_3b_3\right)=P'_0,\\&\ddot{y}_4\left(Mb_1^2+Ia^2\right)+\ddot{y}_1\left(Ma_1b_1-Ia^2\right)+\\&+y_4\left(k_4+k_2b_2^2+k_3b_3^2\right)+y_1\left(k_2a_2b_2+k_3a_3b_3\right)=P''_0.\end{aligned}\right\}\qquad(10)$$

Здесь P'_0 и P''_0 - обобщенные внешние силы в точках (1) и (4), а потенциальная энергия определяется выражением:

$$\begin{aligned}&\Pi=\frac{1}{2}k_1\left(y-d_1\varphi\right)^2+\frac{1}{2}k_2\left(y_1a_2+y_4b_2\right)^2+\\&+\frac{1}{2}k_3\left(y_1a_3+y_4b_3\right)^2+\frac{1}{2}k_4\cdot\left(y+d_2\varphi\right)^2=\\&=\frac{1}{2}k_1\left(y^2-2yd_1\varphi+d_1^2\varphi^2\right)+\\&+\frac{1}{2}k_2\left[a_2\left(y-d_1\varphi\right)+b_2\left(y+d_2\varphi\right)\right]^2+\\&+\frac{1}{2}k_3\left[a_3\left(y-d_1\varphi\right)+b_3\left(y+d_2\varphi\right)\right]^2+\\&+\frac{1}{2}k_4(y+d_2\varphi)^2=\frac{1}{2}k_1\left(y^2-2yd_1\varphi+d_1^2\varphi^2\right)+\\&+\frac{k_2}{2}\left\{a_2^2\left(y^2-2yd_1\varphi+d_1^2\varphi^2\right)+\right.\\&+2a_2b_2\left(y^2-2yd_1\varphi++yd_2\varphi-d_1d_2\varphi^2\right)+\\&\left.+b_2^2\left(y^2-2yd_2\varphi+d_2^2\varphi^2\right)\right\}+\\&+\frac{1}{2}k_3\left\{a_3^2\left(y^2-2yd_1\varphi+d_1^2\varphi^2\right)+\right.\\&+2a_3b_3\left(y^2-2yd_1\varphi++yd_2\varphi-d_1d_2\varphi^2\right)+\\&\left.+b_3^2\left(y^2+2yd_2\varphi+d_2^2\varphi^2\right)\right\}+\\&+\frac{1}{2}k_4\left(y^2+2yd_2\varphi+d_2^2\varphi^2\right).\end{aligned}\qquad(11)$$

Используя систему координат y,φ, найдем соответствующие вспомогательные соотношения:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\Pi}{\partial\varphi}=-k_1yl_1+k_1l_1^2\varphi-k_2a_2^2l_1y+k_2a_2^2l_1\varphi-k_2a_2b_2yl_1+\\&+k_2a_2b_2l_2y-k_2a_2b_2l_1l_2\varphi+k_2b_2^2\cdot yl_2+k_2b_2^2l_2^2\varphi+k_3a_3^2l_1^2\varphi-\\&-k_3a_3^2yl_1-k_3a_3b_3yl_1+k_3a_3b_3yl_2-k_3a_3b_3l_1l_2\varphi+\\&+k_3b_3^2\cdot yl_2+k_3b_3^2l_2^2\varphi+k_4yl_2+k_4l_2^2\varphi;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\Pi}{\partial y}=k_1y-k_1l_1\varphi-k_2a_2^2\cdot y-k_2a_2^2l_1\varphi+k_2a_2b_2y-\\&-k_2a_2b_2l_1\varphi+k_2a_2b_2l_2\varphi+k_2b_2^2y+k_2b_2^2l_2\varphi+k_3a_3^2y-\\&-k_3a_3^2l_1\varphi+k_3a_3b_3y-k_3a_3b_3l_1\varphi+k_3a_3b_3l_2\varphi+\\&+k_3b_3^2y+k_3b_3^2l_2\varphi+k_4y+k_4l_2\varphi;\end{aligned}$$

$$\frac{\partial T}{\partial\dot{\varphi}}=I\dot{\varphi}.$$

Тогда после ряда преобразований система дифференциальных уравнений движения для расчетной схемы (рис.4) в координатах y,φ примет вид последовательных форм, которые представляют собой интерес для возможных приложений, связанных с введением дополнительных связей:

$$\begin{aligned}&M\ddot{y}+y\left(k_1+k_2a_2^2+k_2a_2b_2+k_2b_2^2+k_3a_3^2+k_3a_3b_3+\right.\\&\left.+k_3b_3^2+k_4\right)-\varphi(k_1l_1+k_2a_2^2l_1+k_2a_2b_2l_1-k_2a_2b_2l_2-\\&-k_2b_2^2l_2+k_3a_3^2l_1+k_3a_3b_3l_1-k_3a_3b_3l_2-\\&-k_3b_3^2l_2-k_4l_2)=P_0^{III};\end{aligned}\qquad(12)$$

$$\begin{aligned}&I\ddot{\varphi}+\varphi\left(k_1l_1^2+k_2a_2^2l_1^2-k_2a_2b_2l_1l_2+k_2b_2^2l_2^2+k_3a_3^2l_1^2-\right.\\&\left.-k_3a_3b_3l_1l_2+k_3b_3^2l_2^2+k_4l_2^2\right)-y(k_1l_1+k_2a_2^2l_1+\\&+k_2a_2b_2l_1-k_2a_2b_2l_2-k_2b_2^2l_2+k_3a_3^2l_1+k_3a_3b_3l_2-\\&-k_3b_3^2l_2^2-k_4l_2^2)=P^{IV}\end{aligned}\qquad(13)$$

или

$$\begin{aligned}&M\ddot{y}+\\&+y\left[k_1+k_2(a_2^2+a_2b_2+b_2^2)+k_3(a_3^2+a_3b_3+b_3^2)+k_4\right]-\\&-\varphi\left[k_1l_1+k_2(a_2^2l_1+a_2b_2l_2-b_2^2l_2)+\right.\\&\left.+k_3(a_3^2l_1+a_3b_3l_1-a_3b_3l_2-b_3^2l_2)-k_4l_2\right]=P_0^{III};\end{aligned}\qquad(14)$$

$$\begin{aligned}&I\ddot{\varphi}+\varphi\left[k_1l_1^2+k_2(a_2^2l_1^2-a_2b_2l_1l_2+b_2^2l_2^2)+\right.\\&\left.+k_3(a_3^2l_1^2-a_3b_3l_1l_2+b_3^2l_2^2)+k_4l_2^2\right]-\\&-y\left[k_1l_1+k_2(a_2^2l_1+a_2^2b_2^2l_1-a_2b_2l_2-b_2^2l_2)+\right.\\&\left.+k_3(a_3^2l_1+a_3b_3l_1-a_3b_3l_2-b_3^2l_2)-k_4l_2\right]=P_0^{IV}.\end{aligned}\qquad(15)$$

В окончательном виде выражения (12)÷(15) приводятся к виду

$$\left.\begin{aligned}&My+y\left[A_1\right]-\varphi\left[B_1\right]=P_0^{III},\\&I\ddot{\varphi}+\varphi\left[A_2\right]-y\left[B_2\right]=P_0^{IV},\end{aligned}\right\}\qquad(16)$$

где

$$A_1 = k_1 + k_2\left(a_2^2 + a_2 b_2 + b_2^2\right) + k_3\left(a_3^2 + a_3 b_3 + b_3^2\right) + + k_4;$$

$$B_1 = k_1 l_1 + k_2(a_2^2 l_1 + a_2 b_2 l_1 - a_2 b_2 l_2 - b_2^2 l_2) + + k_3(a_3^2 l_1 + a_3 b_3 l_1 - a_3 b_3 l_2 - b_3^2 l_2) - k_4 l_2;$$

$$A_2 = k_1 l_1^2 + k_2(a_2^2 l_1^2 - a_2 b_2 l_1 l_2 + b_2^2 l_2^2) + + k_3(a_3^2 l_1^2 - a_3 b_3 l_1 l_2 + b_3^2 l_2^2) - k_4 l_2;$$

$$B_2 = k_1 l_1 + k_2(a_2^2 l_1 + a_2^2 b_2^2 l_1 - a_2 b_2 l_2 - b_2^2 l_2) + + k_3(a_3^2 l_1 + a_3 b_3 l_1 - a_3 b_3 l_2 - b_3^2 l_2) - k_4 l_2.$$

Структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического регулирования в системе координат y и φ представлена на рис. 5, а в системе координат y_1 и y_2 - на рис. 6. В точках (1) и (2) на обоих рисунках показано каким образом будут прикладываться к твердому телу внешние силы возбуждения. Из ниже представленных уравнений могут быть найдены обобщенные силы в двух системах обобщенных координат и определены условия симметрии и снижения воздействий.

$$\ddot{y}_1 A_3 + \ddot{y}_4 B_3 + y_1 B_5 + y_4 B_6 = P_0;$$

$$\ddot{y}_4 A_4 + \ddot{y}_1 B_7 + y_4 B_8 + y_1 B_9 = P_0'';$$

$$A_3 = Ma_1^2 + Ia^2;\ B_3 = Ma_1 b_1 - Ia^2;$$

$$B_5 = k_2 a_2 b_2 + k_3 a_3 b_3;\ A_4 = Mb_1^2 + Ia^2;$$

$$B_7 = Ma_1 b_1 - Ia^2;\ B_8 = k_4 + k_2 b_2^2 + k_3 l^2;$$

$$B_6 = B_9;\ B_3 = B_7.$$

Теперь можно найти обобщенные силы P'_0 и P''_0 для системы координат y_1 и y_4:

$$P'_0 = P_1 + P_2 \frac{l_2 + l'_3 + l_4}{a} + P_3 \frac{l_4}{a}; \qquad (18)$$

$$P'_0 = P_4 + P_3 \frac{l_1 + l_2 + l_3}{a} + P_2 \frac{l_1}{a}, \qquad (19)$$

где $a = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$.

Для системы обобщенных координат y, φ:

$$P_0^{III} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4; \qquad (20)$$

$$P_0^{IV} = P_1(l_2 + l_1) + P_2 l_2 - P_3 l_3 - P_4(l_3 + l_4). \qquad (21)$$

Таким образом, расчетная схема заглаживающей машины может быть приведена к системе с двумя степенями, в которой обобщенные силы могут образовать уравновешенную систему. Однако выполнение таких условий требует соблюдения определенных условий симметрии и метрики (согласования геометрических размеров).

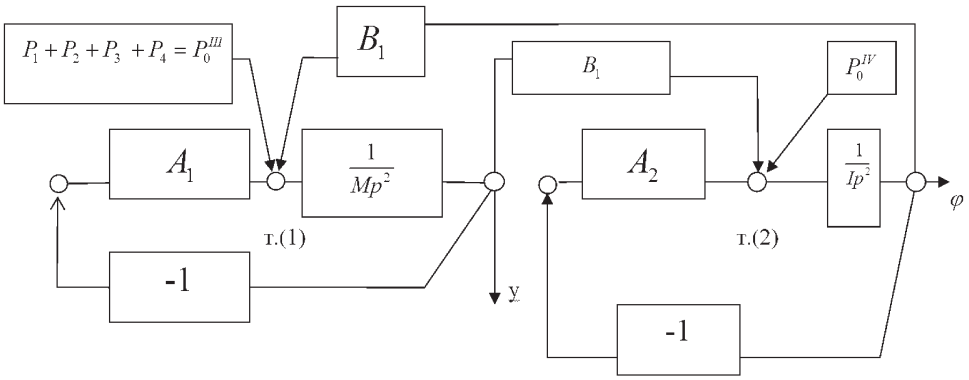


Рис. 5. Структурная схема системы в обобщенных координатах y_1, φ.

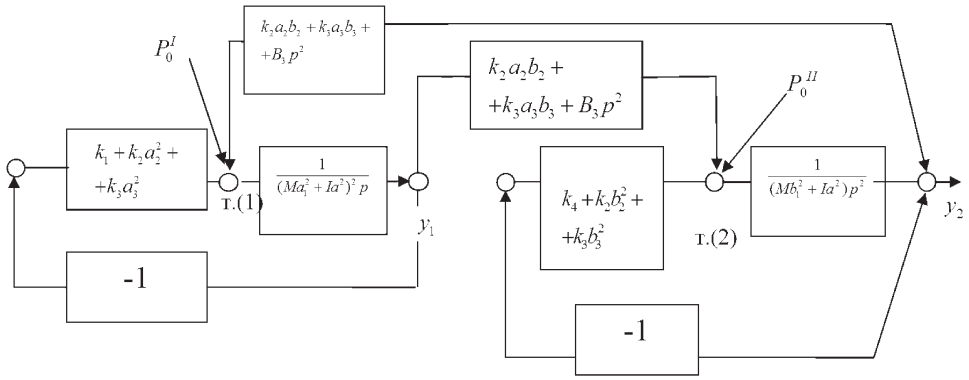


Рис. 6. Структурная схема системы в обобщенных координатах y_1, y_2.

Изучение различных особенностей в приложении внешних сил в колебательной системе с двумя степенями свободы позволяет сформулировать ряд выводов, важных для определения технологических регламентов заглаживая бетонных поверхностей.

Если $P_1 = P_2 = P_3 = P_4$, то условие (18) принимают вид:

$$P'_0 = P\left[1 + \frac{l_2 + l_3 + l_4}{a} + \frac{l_4}{a}\right] = P\left(\frac{a + l_2 + l_3 + 2l_4}{a}\right);$$

$$P''_0 = 1 + 2l_1 + l_2 + l_3 = P\frac{(a + 2l_1 + l_2 + l_3)}{a};$$

$$P_0^{III} = 4P,\ P_0^{IV} = P(l_2 + l_1 + l_2 - l_3 - l_4),$$

из которого следует, что совместные колебательные процессы, угловые и поступательные движения неизбежны, а следовательно, необходимо выполнение условий развязки или вывода узла колебаний из рабочей зоны [4].

Математические модели рабочего блока, представленные выражениями (10), (16), дают представление о характере взаимных связей парциальных движений в двух системах обобщенных координат.

Если при выборе технологического регламента необходимо контролировать угловое движение φ, то при рассматриваемой схеме нагружения желательно, чтобы сумма моментов относительно центра тяжести (т.А) была равна нулю. Таким образом:

$$\sum M = P_1(l_1 + l_2) + P_2 l_2 - P_3 l_3 - P_4(l_3 + l_4) = 0, \quad (22)$$

откуда при равенстве сил $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P$ запишем, что

$$l_1 + 2l_2 - l_4 + 2l_3 = 0. \quad (23)$$

Соблюдение условий (22), (23) определяет ограничения на организацию работы виброголовок. Необходимым условием является не только равенство сил по модулю, но и синхронность движения. Что касается выбора линейных размеров l_1, l_2, l_3, l_4, то они могут иметь отклонения, но при этом должно выполняться условие (23).

Если виброголовки обеспечивают совместную направленность P_2 и P_3, например, вверх (рис.4), то для головок, находящихся по краям, можно рекомендовать движение в противофазе (P_1 и P_4). Тогда, могут быть обеспечены наиболее благоприятные условия для работы блока, если силы $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P$ равны между собой и выполняются следующие соотношения:

$$P_1(l_1 + l_2) = P_4(l_3 + l_4), \quad (24)$$

$$P_2 l_2 = P_3 l_3. \quad (25)$$

При этом, как упоминалось выше, системы силы P_1 и P_4, P_2 и P_3 работают в противофазе. Отметим, что неточное соблюдение условий сдвига фаз может рассматриваться как фактор связности колебаний в системе координат y, φ.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Мамаев Л.А., Кашуба В.Б., Вершинский Н.А., Ситов И.С. «Вибрационный брусовый рабочий орган заглаживающей машины с подвижным сектором // Сборник докладов VI –ой Всероссийской научно-технической конференции «Механики XXI веку». Братск.: ГОУ ВПО «БрГУ». 2007. С. 76-78.
2. Белокобыльский С.В., Ситов И.С. Использование вибраций для выглаживания бетонных поверхностей // Материалы международной научной конференции. Хабаровск. 2007. С. 78-82
3. Мамаев Л.А., Кашуба В.Б., Кононов А.А., Герасимов С.Н. Экспериментальные исследования в области обработки бетонных поверхностей ГОУ ВПО БрГУ, Братск. 2006. 147 с.
4. Гозбенко В.Е. Управление динамическими свойствами механических колебательных систем. // Изд-во ИГУ. Иркутск. 2000. 347 с.

Синеговская Т.С.

УДК 519.218.2

ВЫЧИСЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ РАСПАДОВ ЧАСТИЦ

При изучении ряда процессов физики, связанных с распадами частиц, требуется знание дифференциальных вероятностей таких распадов. Рассмотрим трехчастичные распады вида

$$a_0 \to a_1 + a_2 + a_3.$$

В стандартной теории слабого взаимодействия матричный элемент трехчастичного распада имеет вид (см. [1]):

$$M = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sin\theta_C \Big[f_+\left(q^2\right)\left(p_0 + p_1\right)^\mu + f_-\left(q^2\right)\left(p_0 - p_1\right)^\mu \Big] \bar{a}_2 \gamma_\mu (1+\gamma_5) a_3. \quad (1)$$

Здесь G_F и θ_C - константа Ферми и угол Кабиббо, p_i - 4-импульс частицы i, $i = \overline{0,3}$, $f_\pm\left(q^2\right)$ - форм-факторы, зависящие от $q^2 = \left(p_0 - p_1\right)^2$, квадрата 4-импульса, передаваемого паре частиц a_2, a_3. Будем использовать общепринятую линейную параметризацию

$$f_\pm\left(q^2\right) = f_\pm(0)\left(1 + \lambda_\pm \frac{q^2}{m_1^2}\right).$$

1. Дифференциальная вероятность. Дифференциальная вероятность распада в произвольной системе отсчета имеет вид

$$d\Gamma = \frac{|M|^2}{2(2\pi)^5 E_0} \delta^4(p_0 - p_1 - p_2 - p_3) \frac{d^3 p_1}{2E_1} \frac{d^3 p_2}{2E_2} \frac{d^3 p_3}{2E_3}.$$

Используя стандартные методы вычисления квадрата матричного элемента, находим

$$|M|^2 = 16 G_F^2 \sin^2\theta_C \Big\{ f_+^2\left(q^2\right)\Big[2\left(p_0 p_2\right)\left(p_0 p_3\right) - m_0^2\left(p_2 p_3\right)\Big] - m_2^2 f_+\left(q^2\right)\Big[f_+\left(q^2\right) - f_-\left(q^2\right)\Big]\left(p_0 p_3\right) + \frac{m_2^2}{4}\Big[f_+\left(q^2\right) - f_-\left(q^2\right)\Big]^2\left(p_2 p_3\right)\Big\}. \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что расчет дифференциальных спектров продуктов распада сводится к вычислению следующих трех интегралов:

$$\int \frac{d^3 p_i}{2E_i} \frac{d^3 p_j}{2E_j} \delta^4(q_k - p_i - p_j)|M|^2, \ (i, j, k = \overline{1,3}), \quad (3)$$

где $q_k = (p_0 - p_k)$ Физическая область задается неравенствами $m_i + m_j \le q_k \le m_0 - m_k$.

Для расчета использовался метод ковариантного интегрирования [2]. Выбирая систему координат $q_k = 0$ для интегралов (3),соответственно, интегрируя по импульсу второй и третьей частиц и переходя к полярным координатам, получаем выражения:

$$\frac{\pi}{2q_3^0}|p_1|\int_{-1}^{1} d\cos\theta_1 |M|^2, \quad \frac{\pi}{2q_2^0}|p_1|\int_{-1}^{1} d\cos\theta_1 |M|^2,$$

$$\frac{\pi}{2q_1^0}|p_3|\int_{-1}^{1} d\cos\theta_2 |M|^2.$$

Используя определения кинематических инвариантов

$$q_1^2 = m_0^2 + m_1^2 - 2E_0 E_1 + 2|p_0||p_1|\cos\theta_1,$$

$$q_3^2 = m_0^2 + m_3^2 - 2E_0 E_3 + 2|p_0||p_3|\cos\theta_2,$$

после новой замены переменных $\cos\theta_1 \to q_1^2$, $\cos\theta_2 \to q_3^2$ интегралы (3), можно записать в следующей форме:

$$\frac{\pi}{4\sqrt{\left(\bar{p}_0^0 \bar{q}_i^0\right)^2 - \left(m_0 \bar{q}_i^0\right)^2}} \int_{\alpha_i - \beta_i}^{\alpha_i + \beta_i} d\bar{q}_j^2 |M|^2, \quad (4)$$

$$(i = 2,3,\ j = 1,3,\ i \ne j).$$

Здесь черточкой помечены величины, относящиеся к системе $q_k = 0$ $(k = \overline{1,3})$, p^0, q^0 - первые компоненты соответствующих 4-импульсов. Поскольку величины α_i и β_i являются инвариантами, можно записать их явный вид в произвольной системе отсчета:

$$\alpha_1 = m_0^2 - \frac{1}{2q_1^2}\left(q_1^2 - m_2^2\right)\left(q_1^2 + m_0^2 - m_1^2\right),$$

$$\beta_1 = \frac{1}{2q_1^2}\left(q_1^2 - m_2^2\right)\sqrt{\left(q_1^2 + m_0^2 - m_1^2\right)^2 - 4m_0^2 q_1^2};$$

$$\alpha_2 = m_0^2 + m_1^2 - \frac{1}{2q_2^2}\left(q_2^2 + m_1^2\right)\left(q_2^2 + m_0^2 - m_2^2\right),$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2q_2^2}\left(q_2^2 - m_1^2\right)\sqrt{\left(q_2^2 + m_0^2 - m_2^2\right)^2 - 4m_0^2 q_2^2};$$

$$\alpha_3 = m_0^2 + m_1^2 - \frac{1}{2q_3^2}\left(q_3^2 + m_0^2\right)\left(q_3^2 + m_1^2 - m_2^2\right),$$

$$\beta_3 = \frac{1}{2q_3^2}\left(q_3^2 - m_0^2\right)\sqrt{\left(q_3^2 + m_1^2 - m_2^2\right)^2 - 4m_0^2 q_3^2};$$

Переходя в выражениях (4) к лабораторной системе отсчета, получаем

$$\frac{\pi}{4\sqrt{\left(p_0 q_i\right)^2 - \left(m_0 q_i\right)^2}} \int_{\alpha_i - \beta_i}^{\alpha_i + \beta_i} dq_j^2 \left|M\right|^2,$$

$$(i = 2,3,\ j = 1,3,\ i \neq j).$$

Опуская довольно громоздкие промежуточные выкладки, выражения для дифференциальных вероятностей распадов можно представить в виде:

$$E_1 \frac{d^3\Gamma_1}{d^3 p_1} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C f_+^2(0)}{768\pi^4 E_0 \sqrt{\left(p_0 q_1\right)^2 - \left(m_0 q_1\right)^2}} \times$$
$$\times\Big\{\left(1 + \lambda_1 q_1^2\right)^2 \Big[I_2(m_0^2 + m_1^2, -1,1,0;\alpha_1,\beta_1) -$$
$$-q_1^2 I_2(1,0,1,0;\alpha_1\beta_1) - I_1(m_0^2(m_1^2 - m_2^2, 0,1,0;\alpha_1,\beta_1)\Big] -$$
$$-2m_2^2\left(1 + \lambda_1 q_1^2\right)\left(c + \lambda_2 q_1^2\right) I_1(m_0^2, -1,1,0;\alpha_1,\beta_1) +$$
$$+ m_2^2\left(q_1^2 - m_2^2\right)\left(c + \lambda_2 q_1^2\right)^2 I_1(1,0,1,0;\alpha_1,\beta_1)\Big\};$$

$$E_2 \frac{d^3\Gamma_2}{d^3 p_2} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C f_+^2(0)}{768\pi^4 E_0 \sqrt{\left(p_0 q_2\right)^2 - \left(m_0 q_2\right)^2}} \times$$
$$\times\Big\{\left(m_2^2 - q_2^2\right) I_2(1,\lambda_1,1,\lambda_1;\alpha_2,\beta_2) -$$
$$-\Big[q_1^4 - \left(m_0^2 + m_1^2 + 2m_2^2\right)q_2^2 + m_2^2(m_1^2 + m_2^2) + m_0^2 m_1^2\Big] \times$$
$$I_1(1,\lambda_1,1,\lambda_1;\alpha_2,\beta_2) +$$
$$+2m_2^2(m_1^2 + m_2^2 - q_2^2) I_1(1,\lambda_1,c,\lambda_2;\alpha_2,\beta_2) -$$
$$-m_2^4 I_1(c,\lambda_2,c,\lambda_2;\alpha_2,\beta_2)\Big\}; \tag{5}$$

$$E_3 \frac{d^3\Gamma_3}{d^3 p_3} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C f_+^2(0)}{768\pi^4 E_0 \sqrt{\left(p_0 q_3\right)^2 - \left(m_0 q_3\right)^2}} \times$$
$$\times\Big\{-q_3^2 I_2(1,\lambda_1,1,\lambda_1;\alpha_3,\beta_3) -$$
$$-\Big[m_0^2(m_1^2 - m_2^2) + q_3^4 - (m_0^2 + m_1^2)q_3^2\Big] I_1(1,\lambda_1,1,\lambda_1;\alpha_3,\beta_3) -$$
$$-2m_2^2(m_0^2 - q_3^2) I_1(1,\lambda_1,c,\lambda_2;\alpha_3,\beta_3) +$$
$$+m_2^2 I_2(c,\lambda_2,c,\lambda_2;\alpha_3,\beta_3) + m_2^4 I_1(c,\lambda_2,c,\lambda_2;\alpha_3,\beta_3)\Big\},$$

где введены обозначения для элементарных интегралов

$$I_1(x,y,v,u;\alpha,\beta) = \int_{\alpha-\beta}^{\alpha+\beta} (x + yt)(v - ut)\,dt,$$

$$I_2(x,y,v,u;\alpha,\beta) = \int_{\alpha-\beta}^{\alpha+\beta} t(x + yt)(v - ut)\,dt,$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_+}{m_1^2},\ \lambda_2 = \frac{\lambda_+ - \xi\lambda_-}{2m_1^2},\ c = \frac{1-\xi}{2},\ \xi = \frac{f_-(0)}{f_+(0)}.$$

Выражения в квадратных скобках правой части (5) являются полиномами по q_k^2 $(k = \overline{1,3})$. Это позволяет переписать ширины распадов в компактной форме:

$$E_1 \frac{d^3\Gamma_1}{d^3 p_1} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^2}{768\pi^4 E_0} f_+^2(0)\left(q_1^2 - m_2^2\right)\sum_{n=-3}^{3} c_n^{(1)}\left(\frac{q_1^2}{m_0^2}\right)^n,$$

$$E_2 \frac{d^3\Gamma_2}{d^3 p_2} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^2}{768\pi^4 E_0} f_+^2(0)\left(q_2^2 - m_2^2\right)\times$$
$$\times\sum_{n=-4}^{3} c_n^{(2)}\left(\frac{q_2^2}{m_0^2}\right)^n, \tag{6}$$

$$E_3 \frac{d^3\Gamma_3}{d^3 p_3} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^2}{768\pi^4 E_0} f_+^2(0)\times$$
$$\times\sqrt{\left(q_3^2\right)^2 - 2\mu_+ q_3^2 + \mu_-^2}\sum_{n=-4}^{3} c_n^{(3)}\left(\frac{q_3^2}{m_0^2}\right)^n,$$

где $\mu_\pm = m_1^2 \pm m_2^2$. Фигурирующие здесь коэффициенты $c_n^{(i)}$ зависят от масс частиц и параметров форм-факторов (см. [3]).

2. Полная вероятность. После интегрирования по всем угловым переменным и перехода к безразмерным величинам $y = q_i / m_0^2$ для энергетических спектров вторичных частиц имеем выражения:

$$\frac{d\Gamma_1}{dE_1} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^6}{768\pi^3 E_0 P_0} f_+^2(0)\sum_{n=-3}^{3} c_n^{(1)} \int_{y_1^{(1)}}^{y_2^{(1)}} y^n (y - r_2)\,dy,$$

$$\frac{d\Gamma_2}{dE_2} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^6}{768\pi^3 E_0 P_0} f_+^2(0)\sum_{n=-4}^{3} c_n^{(2)} \int_{y_1^{(2)}}^{y_2^{(2)}} y^n (y - r_1)\,dy, \tag{7}$$

$$\frac{d\Gamma_3}{dE_3} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^6}{768\pi^3 E_0 P_0} f_+^2(0)\times$$
$$\times\sum_{n=-4}^{3} c_n^{(3)} \int_{y_1^{(3)}}^{y_2^{(3)}} y^n \sqrt{(y - y_+^{(3)})(y - y_-^{(3)})}\,dy.$$

Пределы интегрирования определяются массами и энергиями (импульсами) первичной

и вторичной частиц (используются обозначения $r_i = m_i^2 / m_0^2$, $P_i = |p_i|$):

$$y_1^{(1)} = \begin{cases} 1 + r_1 - 2(E_1E_0 + P_1P_0)/m_0^2, & E_1 \le E_-^{(1)}, \\ r_2, & E_-^{(1)} \le E_1 \le E_+^{(1)}, \end{cases}$$

$$y_2^{(1)} = 1 + r_1 - 2(E_1E_0 - P_1P_0)/m_0^2,$$

$$E_\pm^{(1)} = \frac{E_1^{\cdot}E_0 \pm P_1^{\cdot}P_0}{2m_0}, \quad E_1^{\cdot} = \frac{m_0^2 + m_1^2 - m_2^2}{m_0},$$

$$P_1^{\cdot} = \sqrt{\left(E_1^{\cdot}\right)^2 - m_1^2}, \quad y_\pm^{(1)} = \frac{\left(m_0 \pm m_1\right)^2}{m_0^2};$$

$$y_1^{(2)} = \begin{cases} 1 + r_2 - 2(E_2E_0 + P_2P_0)/m_0^2, & E_2 \le E_-^{(2)}, \\ r_1, & E_-^{(2)} \le E_2 \le E_+^{(2)}, \end{cases}$$

$$y_2^{(1)} = 1 + r_1 - 2(E_1E_0 - P_1P_0)/m_0^2,$$

$$E_\pm^{(2)} = \frac{E_2^{\cdot}E_0 \pm P_2^{\cdot}P_0}{2m_0}, \quad E_2^{\cdot} = \frac{m_0^2 + m_2^2 - m_1^2}{m_0},$$

$$P_2^{\cdot} = \sqrt{\left(E_2^{\cdot}\right)^2 - m_2^2}, \quad y_\pm^{(2)} = \frac{\left(m_0 \pm m_2\right)^2}{m_0^2};$$

$$y_1^{(3)} = \begin{cases} 1 + r_3 - 2(E_3E_0 + P_3P_0)/m_0^2, & E_3 \le E_-^{(3)}, \\ y_+^{(3)}, & E_-^{(3)} \le E_3 \le E_+^{(3)}, \end{cases}$$

$$y_2^{(1)} = 1 + r_1 - 2(E_1E_0 - P_1P_0)/m_0^2,$$

$$E_\pm^{(3)} = \frac{(1 - y_+^{(3)})(E_0 \pm P_0)}{2}, \quad y_\pm^{(3)} = \frac{\left(m_1 \pm m_2\right)^2}{m_0^2}.$$

Переходя в систему покоя нулевой частицы, где $\left(q_i^{\cdot}\right)^2 = m_0^2 + m_i^2 - 2m_0E_i^{\cdot}$ $(i = \overline{1,3})$, получаем три эквивалентные формулы для полной вероятности в этой системе:

$$\Gamma_1^{\cdot} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^5}{768\pi^3} f_+^2(0) \times$$

$$\times \sum_{n=-3}^{3} c_n^{(1)} \int_{r_2}^{y_-^{(1)}} (r_2 - y) y^n \sqrt{(y - y_+^{(1)})(y - y_-^{(1)})}\, dy,$$

$$\Gamma_2^{\cdot} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^5}{768\pi^3} f_+^2(0) \times$$

$$\times \sum_{n=-4}^{3} c_n^{(2)} \int_{r_1}^{y_-^{(2)}} (r_1 - y) y^n \sqrt{(y - y_+^{(2)})(y - y_-^{(2)})}\, dy, \tag{8}$$

$$\Gamma_3^{\cdot} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_C m_0^5}{768\pi^3} f_+^2(0) \times$$

$$\times \sum_{n=-4}^{3} c_n^{(3)} \int_{1}^{y_+^{(3)}} (1 - y) y^n \sqrt{(y - y_+^{(3)})(y - y_-^{(3)})}\, dy.$$

Для произвольной системы полная вероятность равна $\Gamma = (m_0/E_0)\Gamma^{\cdot}$.

Результаты расчетов полных ширин K_{l3} распадов с учетом форм-факторов, выполненных по формулам (8), и сравнение с экспериментальными данными приведены в работе [3]. Формулы (7) могут быть полезны при расчетах различных характеристик адронного каскада в атмосфере, для уточнения энергетических спектров и пространственно-угловых распределений атмосферных мюонов и нейтрино в широком диапазоне энергий.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1990. 304 с.
2. Brene N., Egardt L., Qvist B. On the $K_{\mu 3}$ and K_{e3} decay modes//Nucl. Phys. 1961. V. 22. P.553-578.
3. Наумов В.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И. Спектры вторичных частиц в K_{l3} распадах // Материалы Байкальской школы по фундаментальной физике. «Астрофизика и физика микромира». Иркутск: изд-во ИГУ, 1998. С. 211-226.

Зиновьев А.А., Люблинский В.А.,
Белых С.А., Бурашников А.А.

УДК 693.546.4

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕМОНТА ПУТЕВОГО БЕТОНА И БЕТОНА ОБРАТНОГО СВОДА СЕВЕРО-МУЙСКОГО ТОННЕЛЯ

Исследование технического состояния обделки тоннеля, блоков путевого бетона, бетона обратного свода позволили специалистам оценить его как исправное, а на отдельных участках как неисправное ремонтопригодное [6].

Основной причиной высокой степени повреждений бетона тоннеля следует считать несоответствие уложенных бетонов реальным агрессивным воздействиям. Результаты изучения химических, физических и механических параметров воздействия на бетон тоннеля обязывают создавать специальные составы, разбив их по назначению и географии применения в тоннеле, особенно, для бетона обратного свода. Такая специализация требует дополнительных исследований, уточняющих места локализации и размеры повреждений.

Большинство имеющихся рекомендаций по ремонту и содержанию тоннеля предполагают поиск унифицированных материалов и составов, которые позволили бы обеспечить инъецирование заобделочных пространств, тампонаж трещин и свищей, восстановление деформационных и проектных швов бетонирования, заполнение каверн и пустот под обратным сводом с целью общей гидроизоляции сооружения.

Исходя из предварительной оценки условий эксплуатации тоннеля, для ремонтных работ потребуется минимум 4-6 составов смесей, для ликвидации основных дефектов обделки тоннеля. К их числу можно отнести: 1) отрясенные шпалы; 2) отрясенные блоки путевого бетона; 3) выщелачивание цементных бетонов; 4) текущие деформационные и холодные швы; 5) наличие пустот и непрочных включений в бетонах обратного свода (БОС) и путевом бетоне (ПБ).

Установлены следующие факты и признаки локального разрушения бетонов [1]:

а) снижение водонепроницаемости бетонов с 6 атм до 4-2 атм;

б) существенные физические и химические изменения структуры и состава цементного камня;

в) гидролиз гидросиликатов;

г) увеличение общей пористости бетона, со смещением пористости в сторону «открытых» пор;

д) силовые и температурно-усадочные трещины (до 0,5-1,0мм) в бетоне обделок;

е) протечка подземных вод через технологические швы;

ж) пустоты в бетонах обратного свода;

з) зафиксированный разброс прочности образцов путевого бетона и бетона обратного свода (возможно связано с партионной вариацией);

и) низкая прочность бетона в местах проявленной коррозии;

к) зарегистрированы участки с признаками биологической коррозии.

В настоящей работе представлено обоснование и выбор материалов для ремонта основных дефектов Северо-Муйского тоннеля в условиях ограниченного времени, без остановки поездов с временным интервалом до 12 часов.

Путевой бетон и бетон обратного свода требуют первоочередного внимания.

При проведение ремонта в настоящее время смешивание ремонтных смесей производят на месте, подают насосом, конструкция которого исключает возможность примене-

ния инертных заполнителей. Исключен даже песок. Получаемые смеси из теста вяжущих весьма неэффективны как экономически, так и в дальнейшей эксплуатации с точки зрения коррозионной стойкости. Формирующийся цементный камень обладает повышенной пористостью, проницаемостью, подвержен повышенным деформациям (ползучесть, набухание).

Проектные требования к бетонным и железобетонным конструкциям Северо-Муйского тоннеля сформулированы в соответствии с [1], а именно:

а) нормируемая проницаемость тяжелого бетона по прямому показателю (водонепроницаемости) установлена W6 [3];

б) бетон пониженной проницаемости - с коэффициентом фильтрации K_f по ГОСТ 12730.5-84 от $6^{*}10^{-10}$ до $2^{*}10^{-9}$;

в) косвенные показатели проницаемости: водопоглощение бетона по ГОСТ 12730-78 от 4,2 до 4,7%; В/Ц - не более 0,55.

В качестве вяжущего при строительстве использовали цементы Красноярского, Топкинского и Каменского заводов, с минеральными добавками М400-Д20 по ГОСТ10178-85, минералогические составы которых близки и составляют, масс.%:

а) трехкальциевый алюминат - C_3A от 7,2 до 7,6;

б) алит — C_3S от 52 до 56;

в) белит — C_2S от18,5 до 19,7;

г) алюмоферрит — C_4AF от 13,1 до 14.

В качестве заполнителей в бетонах конструкций использованы щебень из гранита (вероятно местного), диабаза, базальта, песок предположительно полевошпатный [3]. Для приготовления путевого бетона использована воздухововлекающая добавка СНВ и суперпластификатор С-3, что дало возможность применять низкие В/Ц (по данным [4] В/Ц=0,43). Бетон основных конструкций сооружения имеет следующие проектные характеристики: класс по прочности на сжатие В25, морозостойкость F300, водонепроницаемость W6.

Ограничим степень агрессивного воздействия среды на конструкции в условиях СМТ конкретными значениями показателей агрессивности жидкой среды для бетонов с W6, указав максимальные значения концентраций веществ, обнаруженных в воде (см. табл.1):

а) зона влажности — *нормальная и влажная*;

б) pH — 8,8-8,9 — *неагрессивная*;

в) углекислота, мг/л — от 10 до 55 — *слабоагрессивная*;

г) магнезийные соли, мг/л — 1,0-2,8 — *неагрессивная*;

д) содержание едких щелочей в пересчете на ионы Na^+ (3-55мг/л), K^+(0,5-2,0 мг/л) — *неагрессивная*;

е) суммарное содержание хлоридов (1-28 мг/л), сульфатов (0-54мг/л) — *неагрессивная*.

На первый взгляд требования по первичной защите конструкций от коррозии в обозначенных условиях эксплуатации соблюдены.

Существуют документальные подтверждения, что при строительстве СМТ осуществлялся комплекс необходимых контрольных мероприятий по освидетельствованию скрытых работ и монтаж конструкций, укладка монолитного бетона, замоноличивание стыков в целом осуществлена с соблюдением проектных норм. Длительные перерывы в бетонировании стали причиной неизбежных де-

Табл. 1.

Принадлежность элементов конструкций к условиям эксплуатации.

Конструктивный элемент	Материал, использованный при строительстве	Местоположение и характеристика условий
Путевой бетон	Тяжелый бетон В15; F300 ; W6	Внутри тоннеля положительные температуры, при постоянном увлажнении; на участках примыкающих к портальной части — то же, при колебаниях температуры и влажности наличие испарения, температурные деформации, прямой контакт с водой
Бетон обратного свода.	Тяжелый бетон В25 F 200; W6	Высокая степень оводнения, наличие проточной воды, фильтрация, контакт с коренными породами, длительные сроки укладки и эксплуатации, неоднородность составов

фектов в виде границ послойного бетонирования (контактные технологические швы горизонтальные и вертикальные).

Одним из самых сложных швов такого происхождения является контактная зона между путевым бетоном и бетоном обратного свода. В зоне контакта локализуются грунтовые воды, интенсифицируя коррозию бетона и арматуры, в ней установлено большое количество дефектов, полостей, разрушения вплоть до прогибов путевого бетона.

Северомуйский железнодорожный тоннель выполнен в основном из подковообразных бетонных и железобетонных обделок. На отдельных участках тоннеля имеются чугунные обделки. Внизу обделка соединена бетоном обратного свода толщиной 83 см, класс бетона В25. На это основание уложен путевой неармированный бетон толщиной 40 см проектной маркой М150. На отдельных плитах — бетон класса В15. Элементы верхнего строения пути составляют единую конструкцию, которая воспринимает нагрузки от подвижного состава и передает это воздействие на основание.

В тоннеле по данным [7] запроектирована безбалластная конструкция верхнего строения пути. Путевой бетон, как элемент верхнего строения пути, расчетом на прочность и деформативность не проверялся в соответствии с действующими на момент проектирования нормами — СНиП II-44-78 и СНиП II-39-76.

Следует отметить, что при любом качестве бетонных работ, ни о какой адгезии путевого бетона к бетону обратного свода речи быть не может. Динамические нагрузки от подвижного состава и сейсмические горизонтальные и вертикальные воздействия в тектонической зоне тоннеля в обязательном порядке привели бы к появлению реального шва между двумя видами бетона. Наличие коррозионной среды привело к возникновению очагов поражения в зоне контакта, в первую очередь, путевого бетона, как менее прочного и более деформативного по сравнению с бетоном основания пути.

Рассмотрим взаимодействие путевого бетона и бетона основания. Предположим, что нагрузка действует только в вертикальном направлении. Действие динамических воздействий, демпфирование в первом приближении не рассматривается.

Обычно при балластной конструкции основание рассматривается как упругая среда. При безбалластной конструкции рассмотрим взаимодействие путевого бетона и бетона основания методом конечных элементов. При рассмотрении путевого бетона, лежащего на жестком основании, данные расчета тривиальны — деформации конструкций равны нулю, перемещения конструкций равны нулю.

Смоделируем работу поврежденного коррозией путевого бетона, лежащего на жестком основании (рис. 1). В расчетной схеме принято 221 пространственных изопараметрических восьмиузловых конечных элементов с 512 узлами. Само основание жестко закреплено, а путевой бетон связан с основанием односторонними связями, работающими только на сжатие.

Поперечные размеры модели определялись принятым габаритом тоннеля С. Размер основного объемного конечного элемента составлял 0,3х0,05х0,5 м. Начальный модуль упругости принимался для путевого бетона равным $2{,}3 \times 10^7$ кН/м^2; для бетона основания — $3{,}0 \times 10^7$ кН/м^2. Объемная нагрузка принималась равной $1{,}23 \times 10^4$ кН/м^3 и соответствовала максимальной нагрузке на ось локомотива. Между путевым бетоном и бетоном основания пути смоделирована полость, вызванная коррозией путевого бетона, высотой 50 мм размером 900 мм. Расчет выполнялся с помощью программного комплекса SCAD. Плоская деформированная схема приведена на рис. 2. Максимальное перемещение по верти-

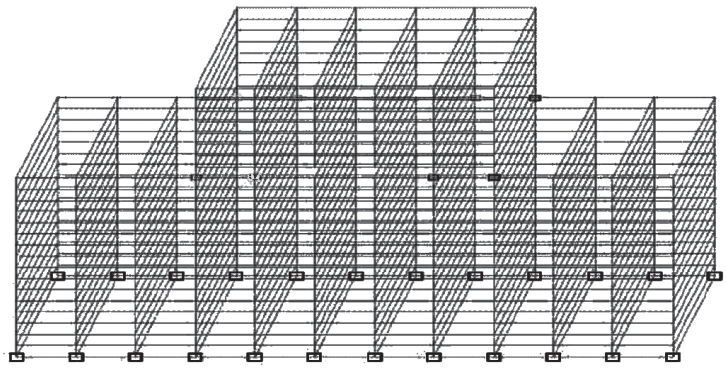


Рис. 1. Расчетная схема модели «путевой бетон – бетон основания».

кальной оси Z составило 0,093 мм. Как видно, перемещения конструкций достаточно малы.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние системы «путевой бетон — бетон основания пути». На рисунках 3 и 4 приведены эпюры Nx и Nz. Можно заметить, что в районе сопряжения бетона основания и путевого бетона возникает концентрация напряжений. При этом зона влияния нагрузки распространяется на глубину до 500 мм в бетон основания. Возникающие полости в зоне контакта двух бетонов еще в большей степени способствуют развитию растягивающих и сжимающих напряжений.

Заполнение полостей бетоном должно устранить это явление. Рассмотрим другую модель — по длине пути с полостью, заполненной мелкозернистым ремонтным бетоном с небольшой прочностью, равной В3,5.

Поперечные размеры приняты такие же, длина пути — 12 м. Модель представляет собой плиту, лежащую на упругом основании и опирающуюся на часть бетона основания.

Плита (путевой бетон) моделируется прямоугольным четырехузловым конечным элементом толщиной 40 см. Для учета упругого основания используются коэффициенты постели упругого основания на сжатие и на сдвиг, определенны на основании нового бетона, который вводится в пространство между путевым бетоном и бетоном основания. Толщина слоя принимается равной 5 мм, модуль упругости $7{,}0 \times 10^5$ кН/м^2, коэффициент Пуансона принимается равным 0,2. Влияние бетона основания учитывается введением связей конечной жесткости (конечный элемент № 51) по краям отрезка в 12м. Расчетная схема приведена на рис. 5.

Перемещения, в этом случае, близки к нулю. Эпюра изгибающих моментов приведена на рис. 6. Они также достаточно малы, что свидетельствует о определенном решении проблемы.

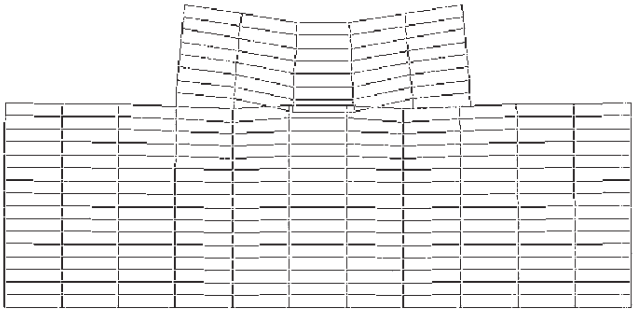


Рис. 2. Деформированная схема модели «путевой бетон – бетон основания».

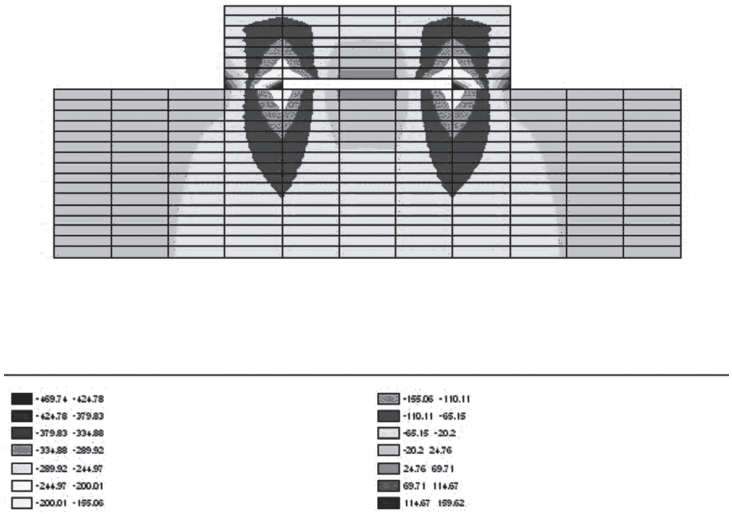


Рис. 3. Эпюра нормальных усилий по вертикальной оси Z.

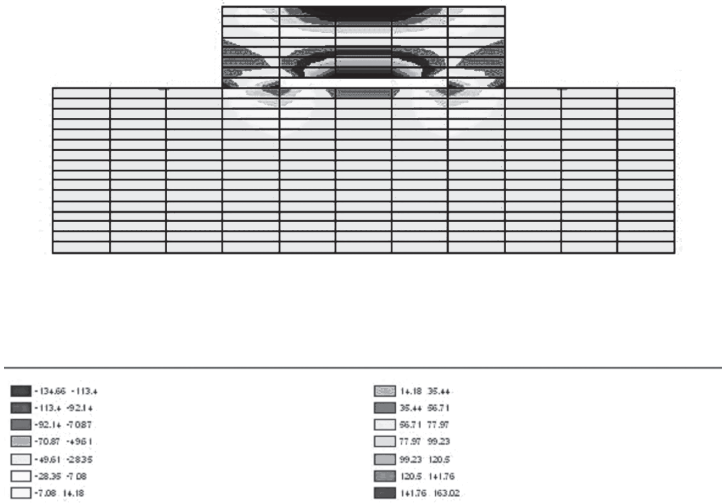


Рис. 4. Эпюра нормальных усилий по оси X.

Проведенные расчеты показывают, что к моменту начала движения прочность ремонтного состава, нагнетаемого в пространство между путевым бетоном и бетоном обратного свода, должна быть не менее В3,5 (модуль упругости $7{,}0 \times 10^5$ кН/м^2).

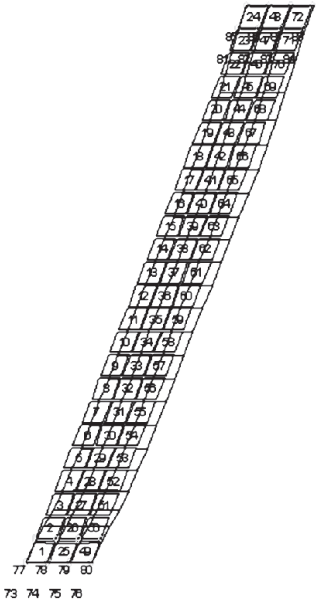


Рис. 5. Расчетная схема 12 м участка пути.

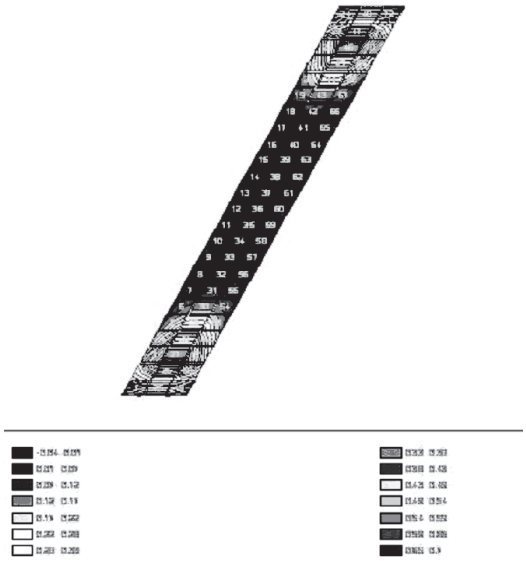


Рис. 6. Эпюра изгибающих моментов Мх участка 12 м пути.

Исходя из выше обозначенных условий, можно сформулировать следующие требования к свойствам ремонтных материалов:

а) ускоренное твердение при пониженных положительных температурах окружающей среды;

б) передаточная прочность через 6-8 часа для бетонов обратного свода и путевого бетона не менее 5 МПа ;

в) стойкость в мягких водах;

г) минимизация возможности химической коррозии 2-го и 3-го видов;

д) адгезия к влажным (мокрым) поверхностям;

е) повышенная плотность (не менее 2200 кг/м^3);

ж) морозостойкость F200, F300 (обусловлено проектом);

з) класс по прочности БОС- В25; ПБ-В15 (в соответствии с проектом);

и) оптимальные стоимости и расход материалов (приближение изготовителя материалов без ухудшения качества);

к) реологические характеристики смесей соответствуют подаче бетононасосами.

Ассортимент материалов для ремонта гидротехнических и подземных сооружений весьма значителен. Однако, при всех заявленных качествах и свойствах готовых ремонтных смесей, производители редко легализуют состав. Такие материалы нового поколения часто имеют незначительные сроки эксплуатации, не накоплен опыт их длительного применения. Без точной информации о химсоставе вяжущих, качестве заполнителей сложно принять предварительное решение о возможности применения материала в конкретных условиях. Необходима их апробация и предварительные исследования независимыми (третьими лицами) экспертами.

В настоящее время для ремонта используют следующие материалы:

а) «МАКФЛОУ» - вяжущее быстрого схватывания и твердения, расширяющийся, безусадочный реопластичный цемент;

б) «СТРИМПЛАГ» - быстроотвердевающий расширяющийся состав, представляет собой смесь специального цемента, кремний содержащих наполнителей и различных добавок; при смешивании с водой образует быстросхватывающийся герметизирующий состав, .начинает схватываться в течение примерно 0,5 минут после затворения водой, выделяя большое количество тепла; среднее время полного схватывания — 1-2 минуты.

в) «СТРИМСМЕСЬ» - обеспечивает проникновение активных минеральных добавок в поры и капилляры защищаемого материала, и образует на поверхности прочный бронирующий слой (герметик может также использоваться как добавка в строительные растворы), который представляет собой смесь специального цемента, кремнийсодержащих наполнителей и различных добавок; при смешивании с водой образует высокопроникающую пластичную массу; жизнеспособность 20 мин., чувствителен к передозировке воды.

Описанный в публикациях опыт применения гидроизолирующего защитного состава «Кальматрон» опробован и использован в тоннеле с 2001 по 2004 год. Однако фильтрация воды через бетон обделки дает основание предположить, что размеры пор могут в значительной степени превышать 0,3 мм, что является сдерживающим фактором применения пенетрирующих материалов подобного рода, которые не решат разноплановых проблем разрушения бетонов, в том числе, в глубинных слоях. Исследованиями было установлено, что самые большие фильтрационные каналы наблюдаются у крупнозернистых бетонов, а самые мелкие у запесоченных бетонов. По архивным данным ЦСЛ средний расход цемента при монолитном бетонировании — 430 кг/м^3

Сами изготовители рекомендуют данные смеси в качестве вяжущих (Макфлоу, Стримплаг) или добавок к ремонтным составам (Стримсмесь). Кроме того неясно, как при сроках схватывания до 0,5 минут можно качественно уложить смеси в условиях СМТ, не нарушая рекомендаций по расходу воды и т.д.

Нами исследованы составы с применением следующих материалов:

ГЦ — глиноземистый цемент ГЦ-40; ПЦ — портландцемент ПЦ М500Д0; НЦ — напрягающий цемент; МакЦ — специальный расширяющий безусадочный реопластичный цемент Макфлоу 62,5; П — обогащенный кварцевый песок (Мк = 1,64); Д1 — полипласт СП-1 (ТУ 5870-005-58042865- 05); Д2 — суперпластификатор С-3 (ТУ 2481-001- 51831493-00); Д3 — формиат кальция; Д4 — Реламикс (ТУ 5870-002-14153664-04); Д5 — суперпластификатор Sika ViscoCrete® 5-600; Д6 — суперпластификатор Melment© F 15 G.

Результаты сравнительных испытаний приведены в таблице 2.

Табл. 2

Результаты экспериментальных исследований

Шифр состава	Процентное соотношение сухих компонентов	В/Ц	Растекаемость, см	Плотность смеси, кг/м^3	Водопоглощение, %	Плотность образцов, кг/м^3	Прочность при нормальных условиях Изгиб/сжатие в МПа				
							8 часов	24 часа	3 суток	7 суток	28 суток
1	ГЦ = 50% П = 50%	0,48	13	2070	12	2031	1,7 4,6	4,6 26	4,5 36	5,5 33,1	8 48,5
2	ГЦ = 33% П = 67%	0,72	14	2055	11	2040	0,9 1,1	2,4 12,1	3,6 14,8	5,7 28,1	6 31,1
3	ГЦ = 50% П = 50% Д1 = 0,6% от массы цемента	0,49	12	2070	4,5	1973	2,6 9,6	4,2 27,7	4,0 37,6	3,7 48,1	7,2 50,2
4	ГЦ = 50% П = 50% Д2 = 0,8% от массы цемента	0,38	12	2130	4	2120	2,6 10	4,9 35,2	5,5 41,2	5 55,6	8,2 58,7
5	ГЦ = 50% П = 50% Д3 = 4% от массы цемента Д2 = 0,8% от массы цемента	0,38	11	2160	5	2090	0,9 2,4	1,6 4,4	3,5 25,3	4,1 35,7	7,6 47,6
6	ГЦ = 50% П = 50% Д4 = 0,8% от массы цемента	0,4	12	2110	7	2109	0,6 1,2	4,8 28,5	5,1 42,6	5,3 42,4	8,8 54,1
7	ПЦ = 50% П = 50%	0,5	14	2120	9	2012	-	2,1 15	3 21,5	4,1 32,1	4,6 44,2
8	ПЦ = 33% П = 67%	0,63	13	2150	10	2020	-	1,6 8,1	2,8 11,1	3,8 20,1	4,3 28,7
9	ПЦ = 50% П = 50% Д1 = 0,6% от массы цемента	0,38	15	2180	7	2168	-	3,8 25,4	4,8 32,9	5,6 46,4	5,9 61,6
10	ПЦ = 50% П = 50% Д2 = 0,8% от массы цемента	0,35	14	2210	4,7	2137	-	6,5 29,4	7,8 39,1	6,2 46	6,1 59
11	ПЦ = 50% П = 50% Д4 = 0,8% от массы цемента	0,38	14	2230	6	2137	-	3,8 27,1	4,9 36	4,6 42	4,9 50,8
12	ПЦ = 50% П = 50% Д3 = 4% от массы цемента Д2 = 0,8% от массы цемента	0,42	11	2180	7	2070	-	3,2 17,5	4 24,6	4,5 43,1	4,8 52,5

Табл. 2 (продолжение)

Шифр состава	Процентное соотношение сухих компонентов	В/Ц	Растекаемость, см	Плотность смеси, кг/м^3	Водопоглощение, %	Плотность образцов, кг/м^3	Прочность при нормальных условиях Изгиб/сжатие в МПа				
							8 часов	24 часа	3 суток	7 суток	28 суток
13	ПЦ = 40% ГЦ = 10% П = 50%	0,46	13	2150	9	2137	0,8 1,1	1,1 2,4	2,9 9,2	3,2 23,2	3,6 31,7
14	ПЦ = 26,4% ГЦ = 6,6% П = 67%	0,64	14	2130	9	2117	0,7 0,8	1 1,6	1,7 2,3	2,9 10,8	3,8 18,2
15	ПЦ = 40% ГЦ = 10% П = 50% Д1 = 0,6% от массы цемента	0,39	14	2150	7	2136	1,1 1,6	1,2 2,7	3,5 18,4	5,3 26,4	5,1 31,6
16	ПЦ = 40% ГЦ = 10% П = 50% Д2 = 0,8% от массы цемента	0,36	16	2190	6	2176	1,3 2,0	1,5 3,1	3,8 23,9	3,9 29,9	4,3 36
17	ПЦ = 40% ГЦ = 10% П = 50% Д4 = 0,8% от массы цемента	0,37	13	2220	6	2207	1,2 2,4	2,1 5,6	3,9 25,1	5,2 30,5	5,5 34,9
18	ПЦ = 40% ГЦ = 10% П = 50% Д3 = 4% от массы цемента Д2 = 0,8% от массы цемента	0,37	11	2090	7	2060	0,9 1,2	1,4 3,5	4,4 22,8	6,2 30,7	6,5 35,9
19	ПЦ = 45% НЦ = 5% П = 50%	0,46	12	2140	11	2059		3,3 12,4	4 30	4,6 35,5	4 47,4
20	ПЦ = 45% НЦ = 5% П = 50% Д1 = 0,6% от массы цемента	0,38	13	2210	6	2168		4,5 23,1	3,3 45,3	7,3 47,9	7,2 63,9
21	ПЦ = 45% НЦ = 5% П = 50% Д2 = 0,8% от массы цемента	0,33	14	2190	4	2148		5,3 25,1	3,4 48,1	8 52	8,2 60,8
22	ПЦ = 45% НЦ = 5% П = 50% Д5 = 0,8% от массы цемента	0,35	13	2200	6	2148		5 23,9	5,1 49,3	7,8 57,5	8,1 69,8
23	ПЦ = 45% НЦ = 5% П = 50% Д6 = 1,2% от массы цемента	0,28	24	2310	3	2246		6,1 37,7	7,2 55	8,3 69	8,6 76,5
24	ПЦ = 45% НЦ = 5% П = 50% Д4 = 0,8% от массы цемента	0,28	20	2250	2	2207		4,8 42,8	7 54	7 60,8	7,2 72,2
25	Сухая бетонная смесь EMACO® S88C	В/Т = 0,157	17,5*		4	2148	0,5 2,8	5,5 24,6		6,6 44	
26	Сухая бетонная смесь EMACO® T545	В/Т = 0,06	17*		5	2227	7,4 37**	9,7 61		10,3 65,6	
27	МакЦ = 30% П = 70%	0,44	9***	2190		2087		10	35	45	50

Табл. 2 (продолжение)

Шифр состава	Процентное соотношение сухих компонентов	В/Ц	Растекаемость, см	Плотность смеси, кг/м³	Водопоглощение, %	Плотность образцов, кг/м³	Прочность при нормальных условиях Изгиб/сжатие в МПа				
							8 часов	24 часа	3 суток	7 суток	28 суток
30	ПЦ = 50% П = 50% Д2 = 0,8% от массы цемента Д4 = 1% от массы цемента	0,28	15	2160	3	2137		4,3 39,5	7,1 59,1	9 56,1	9,5 67,4
31	ПЦ = 50% П = 50% Д5 = 0,8% от массы цемента Д4 = 1% от массы цемента	0,3	14	2160	4	2098		4,6 29,1	8 46,4	7 47,6	8 58,9
32	ПЦ = 50% П = 50% Д6 = 1,2% от массы цемента Д4 = 1% от массы цемента	0,27	20	2230	3	2156		4,5 37,2	8 54	9,7 68,4	10 72,7
33	ПЦ = 50% П = 50%	0,47	14	2130	11	2051		3,6 15	4,9 23,1	5,8 31,1	6,2 43,1
34	ПЦ = 40% НЦ = 10% П = 50%	0,5	14	2105	13	2031		3,1 11	3 24,2	4,4 29,8	6,3 25,1
35	ПЦ = 35% НЦ = 15% П = 50%	0,46	14	2100	12	2090		3,3 12,3	2,7 25,1	5,4 31,5	6,1 30
36	ПЦ = 40% НЦ = 10% П = 50% Д4 = 0,8% от массы цемента	0,39	13	2200	6	2188		5,1 23,3	5,4 38	6,8 40,7	6,5 37,6
37	ПЦ = 40% НЦ = 10% П = 50% Д2 = 0,8% от массы цемента	0,33	19	2190	6	2070		4,9 20,5	5,1 49	8 51,6	7,7 43,2
38	ПЦ = 35% НЦ = 15% П = 50% Д4 = 0,8% от массы цемента	0,34	13	2200	4	2148		5,6 28	4,8 43,8	7,2 47,9	7,6 41,0
39	ПЦ = 35% НЦ = 15% П = 50% Д2 = 0,8% от массы цемента	0,33	13	2210	5	2168		5,5 27,5	5,4 49,9	7,2 54,3	5,8 43,1

*** - подвижность по ГОСТ 310.4 ** - прочность при нормальном твердении в возрасте 1 часа *** - подвижность по ГОСТ 5802.**

Анализ проведенных экспериментальных исследований и сформулированные выше требования к ремонтным смесям позволили рекомендовать для нагнетания в пустоты между путевым бетоном и бетоном обратного свода (указан расход материалов на одну тонну сухой строительной смеси, кг):

- глиноземистый цемент ГЦ 40- 496 кг;
- песок кварцевый $М_к$ = 1,5-2,0- 500 кг;
- суперпластификатор С-3 - 4 кг.
- водоцементное отношение - В/Ц = 0,38; (В/Т = 0,19).

Для нагнетания в полости в бетоне обратного свода рекомендуется:

- портландцемент 500-Д0- 450 кг;
- напрягающий цемент НЦ 20 М500- 50 кг;
- песок кварцевый $М_к$ = 1,5-2,0- 496 кг;
- суперпластификатор С-3 - 4 кг.
- водоцементное отношение - В/Ц = 0,33.

Выводы и рекомендации

Исходя из результатов исследований состояния бетонов конструкций СМТ, условий их эксплуатации, установлено, что:

1) общее состояние строительных конструкций Северомуйского тоннеля оценивается как работоспособное, а состояние верхнего строения пути (путевой бетон, железобетонная шпала, путевые скрепления, рельсы) как ограниченно работоспособное (по терминологии СП 13-102-2003) и требует ограничения скорости движения по тоннелю [7];

2) математическое моделирование конструкции безбалластного пути свидетельствует о возникновении концентрации напряжений и образовании полостей в зоне контакта бетона основания и путевого бетона; заполнение полостей ремонтным составом по длине пути существенно снижает перемещения конструкции и концентрации напряжений в ней;

3) ремонтные составы должны в обязательном порядке содержать заполнитель, в качестве которого необходимо применять чистый кварцевый обогащенный песок для снижения опасности коррозии цементного камня и бетонов, снижение деформативности, пористости;

4) применяемые в настоящее время материалы оптимальны для заделки стыков, швов в обделке тоннеля, в качестве гидропломб, но требуют дополнительных исследований при использовании для ремонта путевого бетона и бетона обратного свода;

5) ремонтный состав, нагнетаемый в горизонтальный шов между путевым бетоном и бетоном обратного свода, к моменту движения должен иметь прочность не менее В3,5.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии./Минстрой России.-М.: ГЦ ЦПП, 1996. - 826 с.
2. СНиП. 3.04.03 — 85. Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии/ Минстрой России. - М.: ГЦ ЦПП, 1996. - 615 с.
3. Пальчинский В.Г., Левченко Е.А. Экспериментальные исследования бетона сводов Северо-муйского тоннеля //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС №4(8). Иркутск. - 2005, С.143-145.
4. Пинус Б.И. Об эксплуатационной пригодности железобетонных обделок Северо-муйского тоннеля //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС №4(8). Иркутск. - 2005, С.145-151;
5. Быкова Н.М. Особенности работы Северо-муйского тоннеля в условиях активной геодинамики //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС №4(8). Иркутск. - 2005, С.169-174;
6. Быкова Н.М., Быкова А.М., Паркалова Е.В. Оценка возможности коррозии бетона в Северо-муйском тоннеле//Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС №4(8). Иркутск. - 2005, С.181-188;
7. Заключение по независимой экспертизе состояния путевого бетона верхнего строения пути Северомуйского тоннеля «БАМ» Республика Бурятия.: г. Иркутск, 2005, 12 с.
8. ТУ 5732-002-40129229-02 «Портландцемент пластифицированный расширяющийся «Макфлоу»
9. ТУ 5745-004-40129229-2002 «Смеси сухие ремонтные ЕМАСО®/ЕМАКО»
10. www.nestor.minsk.by;
11. www.stroysist.ru;
12. www.waskon.ru;
13. www.kntk.ru;
14. www.kalmaflex.ru;
15. www.stroyinform.ru.

Ковенькин Д.А., Ливенцев Е.А., Домбровский Ю.П. УДК 693.546.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ ТИПА ОП-105 И КБ-65 ПРИ ПРОХОДЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА УЧАСТКАХ СЕВЕРОМУЙСКОГО ТОННЕЛЯ

В Северомуйском тоннеле эксплуатируется безбалластная конструкция верхнего строения пути из рельсов типа Р-65 на железобетонных шпалах, замоноличенных в путевой бетон, со скреплением типа КБ-65.

За время эксплуатации железнодорожного пути на участках Северомуйского тоннеля наблюдается наличие большого количества участков пути с просадками, отрясенными шпалами, а в некоторых местах - отрыв целых блоков путевого бетона. Высокая вертикальная жесткость конструкции железнодорожного пути, применяемого в Северомуйском тоннеле, является одной из причин, способствующей появлению таких разрушений. Вибрации, возникающие при качении колёсных пар по рельсам, из-за неизбежного присутствия «ползунов», выщербин и выбоин на колёсах для жёсткого пути, приводят к возникновению дополнительной динамической нагрузки на подрельсовое основание. Ввиду того, что энергия ударного воздействия практически не рассеивается, она расходуется на разрушение путевого бетона, тоннельной обделки и скального основания. В такой конструкции от ударных воздействий, даже при хорошем качестве бетонирования, будут появляться трещины, происходить расслоение между шпалами и путевым бетоном, между путевым бетоном и тоннельной обделкой, а также - между тоннельной обделкой и скальным основанием. Агрессивные водные потоки, проникающие в появляющиеся трещины в конструкциях ВСП и тоннельной обделки, ускоряют процесс разрушения бетона.

Для уменьшения давления, передаваемого от колес подвижного состава на подрельсовое основание, на одном из проблемных участков Северомуйского тоннеля был заложен опытный участок, протяженностью 250 м, с применением промежуточных рельсовых скреплений с клеммами типа ОП-105.

Типовым промежуточным скреплением для железобетонных шпал является раздельное клеммно-болтовое скрепление КБ-65 (рис.1). Рельс к подкладке прижимается жесткими клеммами типа ПК, надеваемыми на клеммные болты, фигурные головки которых заводятся в пазы реборд подкладок. Под гайки клеммных болтов ставят упругие двухвитковые шайбы. Металлические подкладки укладывают на наклонную, заглубленную в тело шпалы на 15-25 мм подрельсовую площадку. На бетон под подкладку укладывают для электро- и виброизоляции резиновую прокладку толщиной 6-10 мм. Благодаря этому улучшается работа бетонных шпал. Подкладка крепится к шпале закладными болтами. При этом головки болтов опираются на замоноличенную в

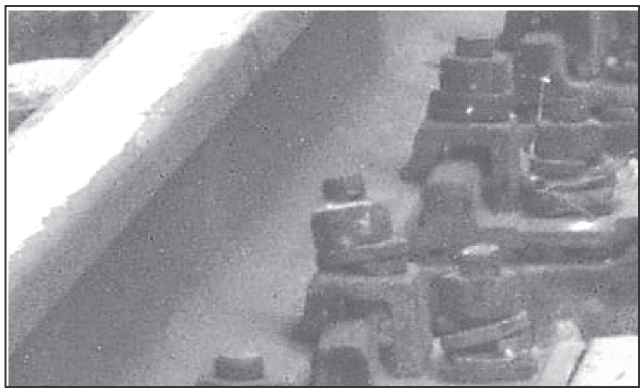


Рис. 1. Скрепление КБ-65 с клеммой ПК.

бетон металлическую шайбу, которая при затяжке монтажных гаек равномерно распределяет нагрузку на бетон. Электроизоляция подкладок от шпал осуществляется нашпальной прокладкой из текстолита, надеваемой на стержень закладного болта и заглубляемой в отверстие металлической подкладки.

Основным недостатком скреплений КБ-65 является нестабильность натяжения прикрепителей, что снижает монтажную затяжку болтов, а также применение жесткой п-образной клеммы типа ПК, которая увеличивает вертикальную жесткость узла рельсового скрепления. Повышению давления, передающегося на шпалы, способствует интенсивное истирание нашпальных и подрельсовых прокладок, используемых в скреплениях КБ.

В качестве модернизации скрепления КБ несколько лет назад было принято решение вместо жестких клемм и двухвитковых шайб на клеммных болтах применять прутковые клеммы шифра ОП-105 по типу SkI-12 немецкой фирмы Vossloh (рис. 2). Такая клемма имеет развитую пространственную форму и сложное напряженное состояние, обусловленное совместным кручением и изгибом ее элементов.

При обследовании опытных участков с клеммами фирмы Vossloh на Октябрьской дороге выявили, что через полгода эксплуатации крутящий момент на гайках клеммных болтов снизился на 15-20 %, в то время как на закладных с двухвитковыми шайбами на 50 % и более. К сожалению, качество клемм, выпускаемых отечественными заводами, невысокое. Клеммы лопаются даже при сборке. Сейчас завершается разработка отраслевого стандарта, в котором предусмотрен ряд мер, исключающих поступление бракованных клемм на дороги. Сравнительные характеристики клемм ПК и ОП-105 для скреплений КБ-65 представлены в табл. 1 [1].

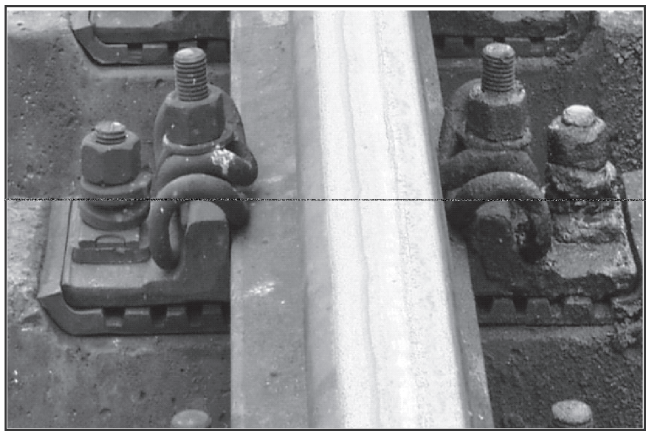


Рис. 2. Скрепление КБ-65 с прутковой клеммой ОП-105.

Для того чтобы установить фактические внешние нагрузки, передающиеся от подвижного состава на подрельсовое основание, а также обосновать эффективность применения промежуточных рельсовых скреплений КБ-65 с упругой клеммой типа ОП-105 вместо клемм ПК, были проведены экспериментальные исследования.

Для экспериментального определения фактических внешних нагрузок, действующих от подвижного состава на рельсы, а также статистических и функциональных закономерностей их появления использовалось тензометрическое оборудование (рис. 3).

Экспериментальные исследования позволили определить фактические внешние на-

Табл. 1

Сравнительные характеристики клемм ПК и ОП-105 для скреплений КБ-65

Тип клеммы	ПК	ОП-105
Вертикальная жесткость клеммы, тс/см	20	5
Максимальное усилие прижатия рельса в тс.	1.0	1.2
Давление на контакте клеммы и рельса, кг/см^2	500-700	200-300
Вертикальная жесткость узла скрепления, тс/см	60-120	60-120

Рис. 3. Схема установки оборудования для определения вертикальных усилий, передающихся на подрельсовые основания.

грузки, передающиеся от подвижного состава на элементы верхнего строения пути. Результаты проведенных испытаний представлены в виде осциллограмм, примеры которых показаны на рис (4-7).

Данные осциллограмм были статистически обработаны. Результаты сведены в табл. 2-3.

По результатам проведенных исследований были установлены величины нагрузок, действующих на элементы верхнего строения пути. Максимальное вертикальное возде-

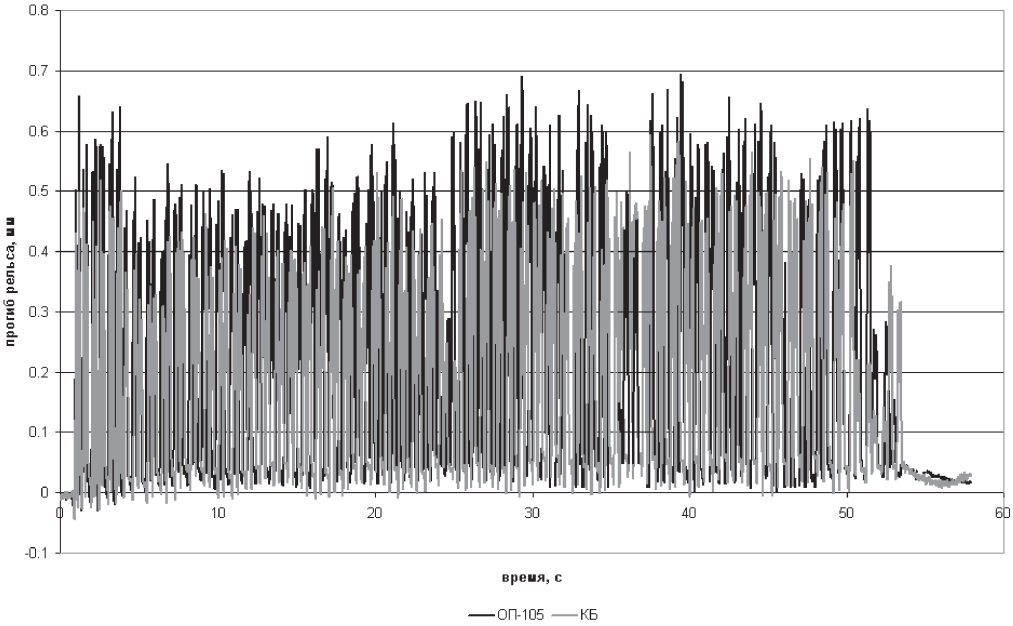


Рис. 4. Образец осциллограммы вертикальных прогибов рельса под колесом, проход вагонов с осевой нагрузкой 20,63 тс/ось.

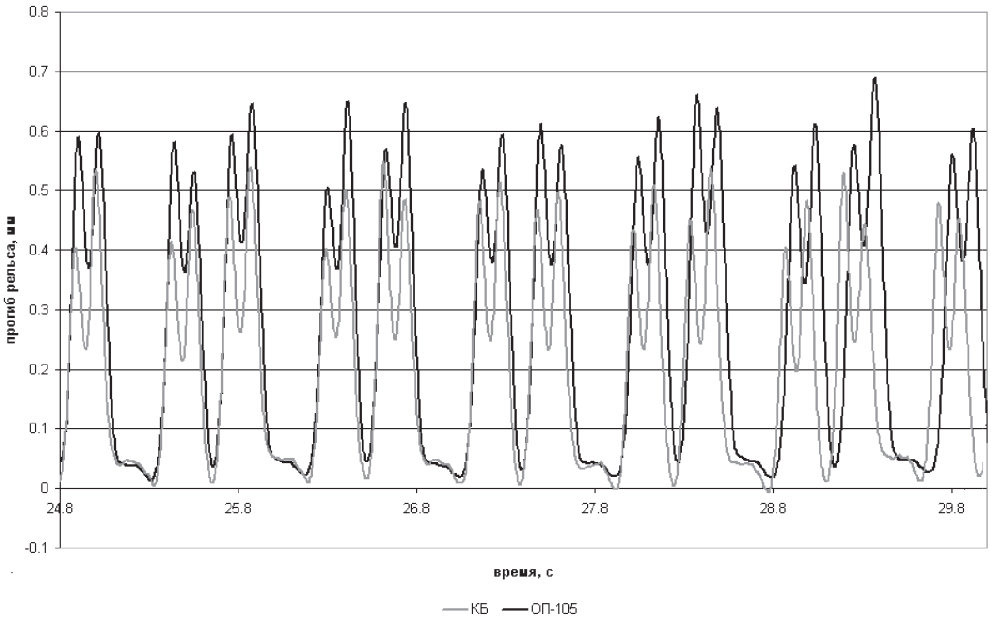


Рис. 5. Фрагмент осциллограммы вертикальных прогибов рельса под колесом, проход вагонов с осевой нагрузкой 20,63 тс/ось.

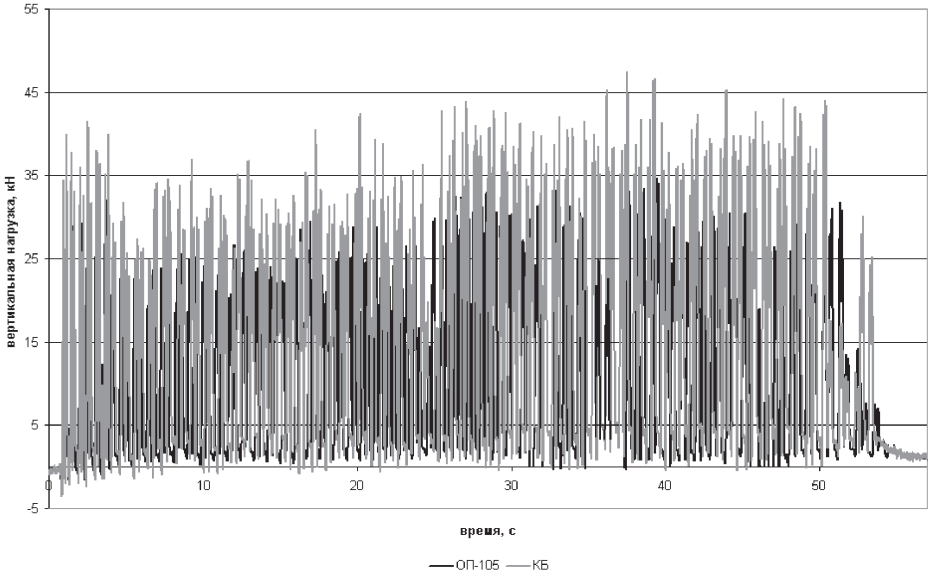


Рис. 6. Образец осциллограммы вертикальной нагрузки, передающейся от рельса на шпалу, проход вагонов с осевой нагрузкой 20,63 тс/ось.

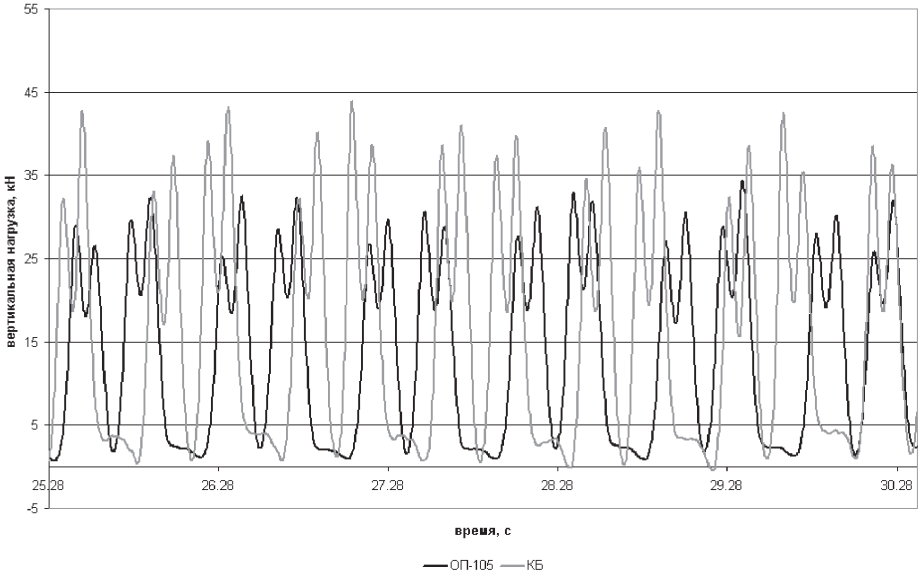


Рис. 7. Фрагмент осциллограммы вертикальной нагрузки, передающейся от рельса на шпалу, проход вагонов с осевой нагрузкой 20,63 тс/ось.

йствие, передающееся от рельса на подрельсовые опоры, при проходе вагонов с тележками ЦНИИ-ХЗ с осевой нагрузкой 20.63 тс/ось, было зарегистрировано на участках с клеммами ПК и составило 43.9 кН. Средние значения вертикальных нагрузок на этих же участках достигали величин в 38.2 кН при СКО 3.66. Максимальное вертикальное воздействие на шпалы на участках с клеммами ОП-105 достигало 34.3 кН, средние нагрузки составили 29.6 кН при СКО 2.48.

При сравнении уровня вертикальных сил, передающихся на шпалы, от стандартной двухосной вагонной тележки осевой нагрузкой 20,63 тс установлено, что давление на шпалу при использовании клемм ПК передается на 28-30% больше, чем при использовании клемм ОП-105. Таким образом можно говорить, что применение упругих клемм ОП-105, вместо клемм ПК на скреплениях КБ-65, будет являться наиболее эффективным. Однако, необходимо провести более тщательные наблюдения за работой скреплений с клеммами ОП-105 под поездной нагрузкой в течение более долгосрочного периода. Эта необходимость вызвана тем, что в процессе эксплуата-

Табл. 2

Экспериментальные значения прогибов рельса под колесом.

	Суммарные вертикальные прогибы, мм	
	Скрепление КБ-65 с упругими клеммами типа ОП-105	Скрепление КБ-65 с клеммами типа ПК
Среднее	0.60	0.48
Стандартная ошибка	0.01	0.01
Стандартное отклонение	0.05	0.05
Эксцесс	-0.49	-0.84
Асимметричность	0.12	-0.26
Интервал	0.18	0.15
Минимум	0.51	0.4
Максимум	0.69	0.55
Уровень надежности(95.0%)	0.02	0.02

Табл. 3

Экспериментальные значения вертикальных нагрузкок, передающейся от рельса на шпалу.

	Суммарные вертикальные нагрузки, передающейся от рельса на шпалу, кН	
	Скрепление КБ-65 с упругими клеммами типа ОП-105	Скрепление КБ-65 с клеммами типа ПК
Среднее	29.62	38.18
Стандартная ошибка	0.51	0.75
Стандартное отклонение	2.48	3.66
Эксцесс	-0.91	-0.91
Асимметричность	0.01	-0.23
Интервал	9	11.9
Минимум	25.3	32
Максимум	34.3	43.9
Уровень надежности(95.0%)	1.05	1.54

ции в Северомуйском тоннеле скреплений ОП-105, момент затяжки клеммных болтов снизился с 170-200 Н/м до 50-70 Н/м. Снижение момента затяжки в течении 2-3 месяцев, произошло в 2.8-3.4 раза. Как уже отмечалось, выше некоторые клеммы ломаются в процессе эксплуатации, замечены также неработающие клеммы (рис. 8).

Рис. 8. Неработающие клеммы на участках Северомуйского тоннеля.

Для уменьшения динамических воздействий подвижного состава, передающихся на подрельсовые основания, при проходе подвижного состава, можно рекомендовать применение более прочных нашпальных резиновых прокладок, армированных лавсаном. Опытный участок с укладкой высокопрочных прокладок можно выделить в Северомуйском тоннеле в месте «вылеченного» отрясенного блока.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Карпущенко Н.И., Антонов Н.И. Совершенствование рельсовых скреплений // Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2003. — 300 с.

Быкова Н.М., Исайкин А.С.,
Моргунов А.Н., Зайнагабдинов Д.А.

УДК 693.546.4

ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В СТЕНАХ ОБДЕЛКИ И ПУТЕВОМ БЕТОНЕ СЕВЕРО-МУЙСКОГО ТОННЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ

Обоснование целесообразности измерительных работ. Геодинамические процессы формирования Байкальской рифтовой зоны совместно с температурными воздействиями и поездными нагрузками вносят изменения в пространственную работу конструкций Северо-Муйского тоннеля в процессе эксплуатации. Это проявляется в образовании трещин в обделках, деструктивных процессах бетона обратного свода, нарушении конструктивных связей между путевым бетоном и бетоном обратного свода, просадках пути. Факторами, характеризующими геодинамические процессы, являются сейсмические процессы, смещения геоблоков по разломам, агрессивность подземных вод.

Кроме сложного сочетания внешних воздействий, существуют особенности пространственной совместной работы конструкций обделки и верхнего строения пути. Обделка тоннеля по длине поделена деформационными швами ориентировочно через 35 м на отдельные блоки. Путевой бетон вместе с омоноличенной в него рельсо — шпальной решеткой при изготовлении положен на бетон обратного свода. Такая конструкция, как одно целое, хорошо работает на статическую вертикальную нагрузку. Работа бесстыкового рельсового пути длиной 15 км на железобетонных шпалах, омоноличенных в путевой бетон, изучена недостаточно, особенно, в условиях неравномерного натяжения клеммных болтов скреплений рельсов со шпалами и температурных перепадов. После ввода тоннеля в эксплуатацию на отдельных участках стали наблюдаться явления отрыва шпал и путевых блоков. Мониторинг продольных деформаций стен обделки и путевого бетона вдоль всего тоннеля позволит оценить дополнительные неучтенные силы, влияющие на работу конструкций, определить механизм их возникновения, оценить количественную составляющую и разработать проектно-технологические решения по их снижению.

Методика измерения остаточных деформаций методом «разгрузки» с использованием фотоупругих датчиков деформаций. Метод «разгрузки» основан на измерении деформаций при искусственном снятии напряжений на локальном участке исследуемой конструкции путем создания вокруг него разгрузочных щелей. При этом происходит упругое восстановление освобожденного участка до первоначального ненагруженного состояния и высвобождение деформаций, адекватных деформациям конструкции при действующих нагрузках. Несмотря на уникально простую методику, широкого практического распространения метод «разгрузки» для бетонных сооружений пока не нашел. Основу метода измерения деформаций, как бы специально предназначенного для натурных условий, составляют фотоупругие датчики деформаций [1,2].

Фотоупругий датчик деформаций (рис. 1) представляет собой пластинку 1 из специального оптически чувствительного материала — отвержденной эпоксидной смолы — с наклеенными по концам накладками 2 (концевиками), предназначенными для крепления датчика к конструкции. На верхнюю поверхность датчика нанесена линейная шкала 3 (1 деление = 1мм) для фиксации положения интерференционных полос. На противоположных

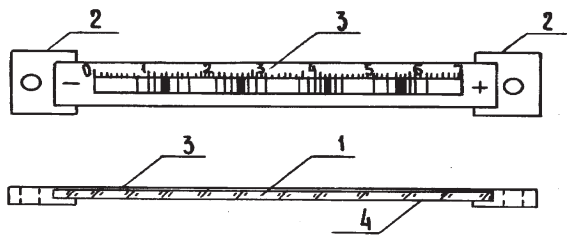


Рис. 1 Схема фотоупругого датчика деформаций 1- пластинка из оптически - чувствительного материала; 2- концевик ; 3- шкала ; 4- светоотражающий слой.

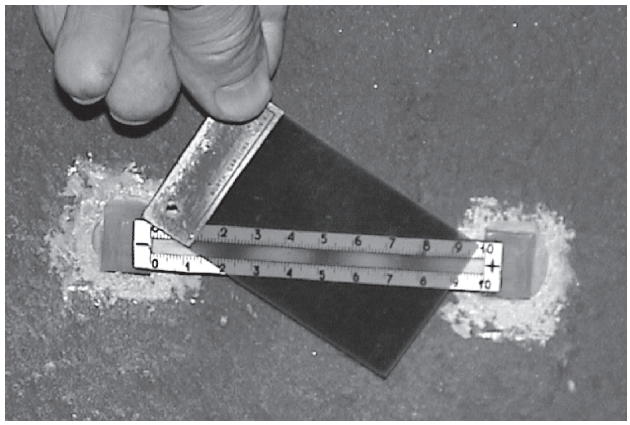


Рис. 2. Интерференционные полосы в датчике, видимые в поляризованном свете.

концах шкалы имеются знаки "+" и "−" для определения знака деформаций — растяжение или сжатие. Нижняя поверхность покрыта светоотражающим слоем 4. Технические характеристики фотоупругих датчиков приведены в табл.1.

Методика работы с фотоупругими датчиками методом «разгрузки» заключается в следующем. Датчик наклеивается в заданной точке исследуемого массива в направлении измеряемых деформаций, после чего фиксируется начальная картина расположения его интерференционных полос (рис. 2). Затем вблизи концов датчика перпендикулярно его оси в массиве делаются пропилы (рис. 3), исключающие из работы сооружения участок массива, на котором укреплен датчик. При этом видимые в лучах поляризованного света интерференционные полосы датчика перемещаются вдоль его оси в одну или в другую сторону, в зависимости от вида деформации (сжатие или растяжение).

Датчик тарирован таким образом, что, если «разгруженный» участок удлиняется, то полосы смещаются в сторону знака «плюс» шкалы датчика. Укорочение участка вызывает смещение полос в сторону знака «минус».

Рис. 3. Момент выполнения разгружающих пропилов.

Относительная деформация е участка конструкции при постоянной температуре определяется с помощью линейного фотоупругого датчика по формуле:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (n_0 - n), \qquad (1)$$

Табл. 1

Технические характеристики фотоупругих датчиков.

1.	Диапазон измерений	$(10 - 300)x10^{-5}$
2.	Чувствительность по деформации	$2x10^{-5}$
3.	Чувствительность к температуре, град.$^{-1}$	$4x10^{-5}$
4.	Расстояние между полосами, мм	40
5.	Длина, мм	100

где: n_0 — положение полосы (в делениях шкалы) датчика после наклеивания датчика; n — положение полосы (в делениях шкалы) датчика после выполнения разгружающих пропилов; ε_0- цена деления шкалы по деформациям, численно равная величине относительной деформации, которая вызывает перемещение полосы на одно деление шкалы датчика (1 мм).

Цена деления ε_0 определяется по результатам тарировочных испытаний, проводимых на бетонных образцах-призмах путем одновременной фиксации деформаций бетона фотоупругим датчиком и деформометром (или тензодатчиком) в процессе нагружения призмы в прессе. Среднее значение ε_0 для фотоупругих датчиков из эпоксидной смолы составляет $2x10^{-5}$ мм$^{-1}$.

Для достоверного определения величины деформации необходимо:

- закрепить датчик таким образом, чтобы обеспечить совместность деформаций датчика и конструкции в месте крепления на протяжении всего процесса измерения;
- выполнить разгружающие пропилы с достаточной глубиной и длиной, чтобы практически полностью снять напряжения в зоне наклейки датчика;
- обеспечить неизменность условий состояния датчика (температура, влажность и др.) или компенсацию их изменений при взятии отсчетов.

Кроме того, в исследуемой зоне градиент деформаций должен быть невелик, чтобы осредненная на базе датчика деформация отличалась от деформации в любой точке зоны не более, чем на величину допустимой погрешности для выбранного типа датчиков деформации.

Поскольку коэффициенты линейного расширения бетона (стали) и эпоксидной смолы, из которой сделан датчик, отличаются, то при изменении температуры в датчике, закрепленном на конструкции, возникают собственные температурные деформации. Величина этих температурных деформаций пропорциональна перепаду температур в моменты снятия отсчетов. При этом показания датчика соответствуют суммарной деформации, складывающейся из деформации конструкции $\varepsilon^к$ и температурной деформации датчика $\varepsilon^т$.

Деформация конструкции в этом случае определяется по формуле:

$$\varepsilon^к = \varepsilon^\partial + \varepsilon^т, \qquad (2)$$

где ε^∂ - суммарная деформация датчика, определяемая по формуле (1); $\varepsilon^т$ - температурная деформация датчика.

Температурная деформация $e^т$ равна:

$$\varepsilon^т = \varepsilon^т_0 \times \Delta T, \qquad (3)$$

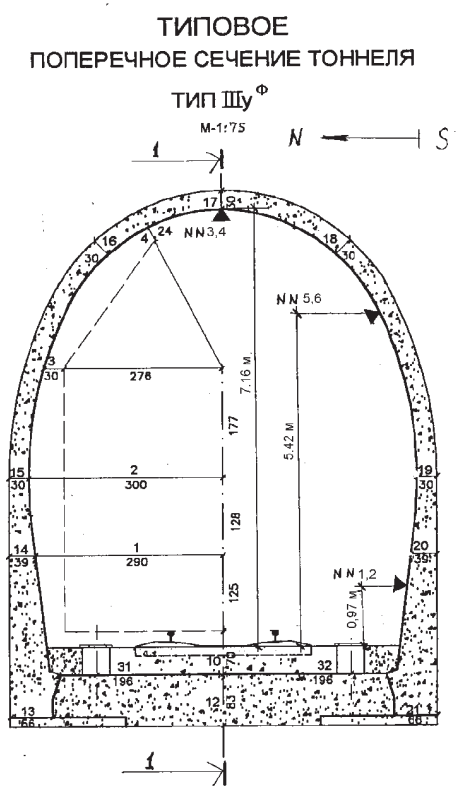
где $\varepsilon^т_0$ - температурная чувствительность датчика, численно равная деформации датчика при изменении температуры в зоне измерений на 1°С при нулевых деформациях самой конструкции;

$\Delta T = T_2 - T_1$ — разность температур в последующий и предыдущий моменты измерений.

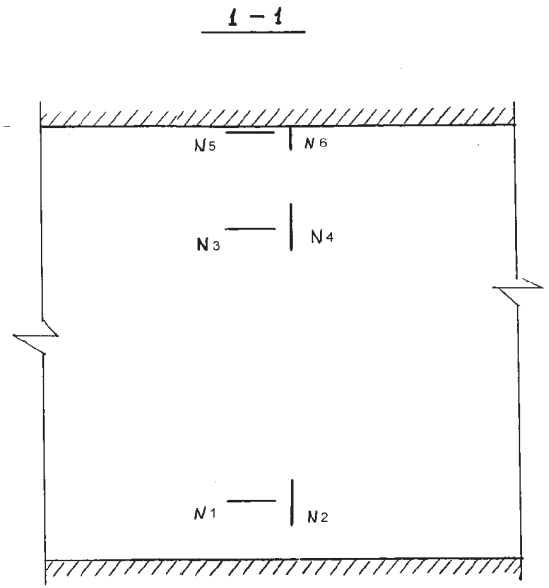
Знак деформации ε^∂ определяется в зависимости от направления смещения полос. Знак температурных деформаций датчика определяется по знаку ΔT. Таким образом, для учета температурных деформаций датчика необходимо измерять температуру вблизи места его установки.

Результаты измерения остаточных деформаций. Измерение деформаций бетонной обделки и путевого бетона проводились выборочно по длине тоннеля ориентировочно через километр. Устанавливались один - два датчика на стенах тоннеля слева и справа, и по два датчика — на путевом бетоне слева и справа от колеи рядом с рельсами между шпалами. Высота установки датчиков на всех стенах тоннеля составляла 1,1 м с учетом удобства работы в условиях прокладки электрических кабелей.

Датчики для измерения деформаций путевого бетона устанавливались на бетон вдоль оси тоннеля. Схема установки датчиков на стенах приведена на рис. 4. Общий график продольных деформаций показан на рис.5. Для выявления общих закономерностей некоторые показатели были искусственно приведены масштабно к одной шкале и показан геологический разрез. Так, количество повреждений в виде отрыва шпал и путевых блоков было пропорционально увеличено на порядок. Такой прием позволил увидеть синхронность графиков продольных деформаций тоннеля, развития повреждений пути в привязке к работе горного массива. Просадки определены при нивелировании головки рельса Тоннелеобследовательской станцией. Данные по повреждениям взяты из дефектных ведомостей.



№№ 1,2 ► - номера и места установки фотоупругих датчиков



Результаты определения прочности бетона

ПК 50+82 запад			
Место замера	**R, МПа**	**Вариация U, %**	**Размах W, %**
Низ стенки (д.1 и 2)	29,6	7,7	22,2
	31,2	14,1	32,6
	27,8	11,4	27,3
	30,2	8,7	18,5
Низ свода (д.3 и 4)	19,0	10.8	24,2
	43,0	13,8	20,1
	35,6	7,4	31,7
	36,2	11,3	22,6
Верх свода (д. 5 и 6)	37,3	8,1	17,1
	50,7	9,6	19,9
	53,4	6,5	18,6
	43,2	11.1	23,1

Показания и деформации фотоупругих датчиков*

ПК 50+82 Запад						
№ датчика	1	2	3	4	5	6
$\Delta n_{ср}$	5,0	4,0	4,8	4,6	8,8	9,75
$\varepsilon^* \times 10^5$	10,0	8,0	10,6	10,2	17,6	19,5
Δt^0C	0	0	+1	+1	0	0
$\varepsilon_t \times 10^5$	0	0	+4	+4	0	0
$\varepsilon \times 10^5$	10,0	8,0	14,6	14,2	17,6	19,5

*Деформации бетона имеют знак, обратный деформациям датчика (см. раздел 2.1)

Рис. 4 Схема расположения фотоупругих датчиков на стенах обделки.

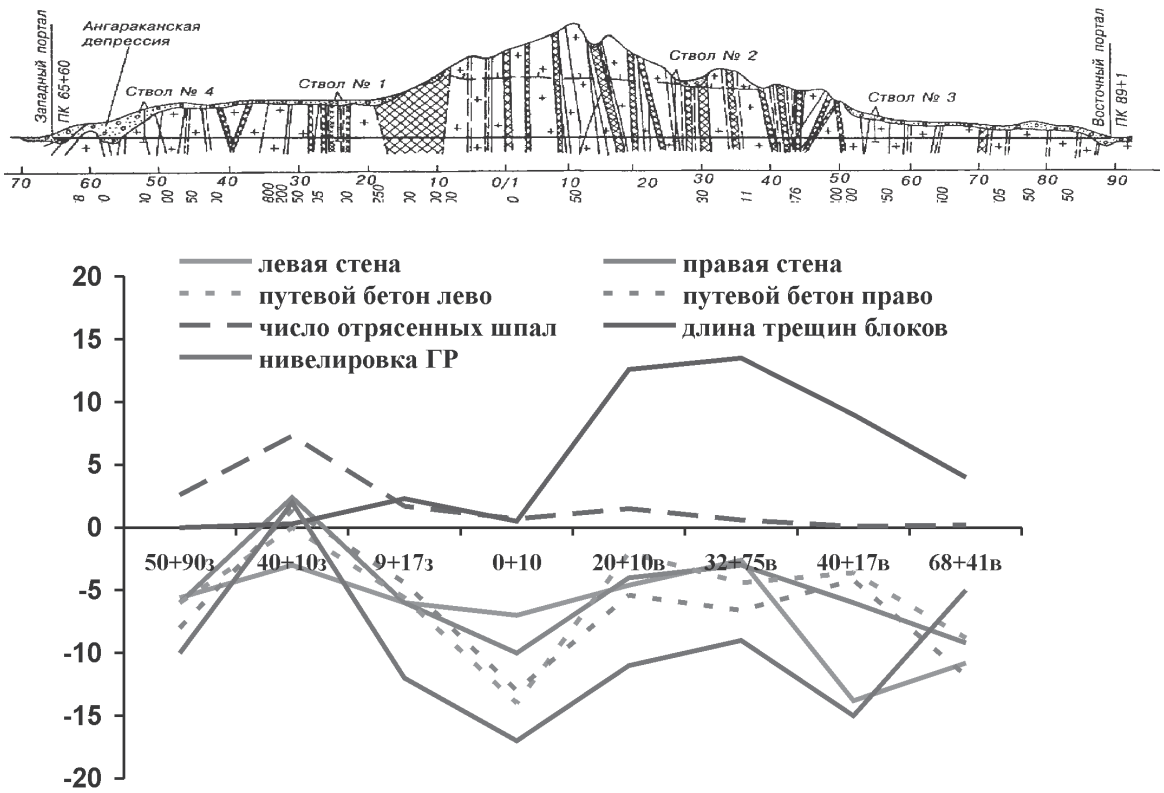


Рис. 5 Деформированное состояние стен обделки и путевого бетона ($e^{*}10^{-5}$) просадок ГР в мм, числа первых «отрясенных» шпал в 2004 г. (*10), длин трещин оторванных путевых блоков (*10).

При наложении различных параметров на одну шкалу обращает на себя внимание синхронность деформирования тоннеля и проявления повреждений в пути.

Судя по деформациям, можно сделать вывод, что работа тоннеля близка к работе неразрезной балки, жестко опертой в районе 40 пикета западного участка и менее жестко — на 22 пикете восточного участка. При этом в середине пролетов между этими участками опирания — в районе ПК 0 и ПК 40вост формируются просадочные зоны. Жесткость опирания можно объяснитьV - образным упором крепких скальных блоков, а проседание - смещением вниз блоков в зоне влияния IV и III тектонических зон. Проседание можно также объяснить деструктивными процессами в бетоне основания пути с образованием пустот и неоднородностей. Количественно деформации в тоннеле характеризуются следующим образом.

Горизонтальные деформации бетона в стенах обделки в разных точках тоннеля в основном являются деформациями сжатия и изменяются от $-2{,}6x10^{-5}$ до $-13{,}8x10^{-5}$ при предельном сжатии для бетонов обделки $-47{,}6\ x10^{-5}$. Исключение составили деформации в сечении ПК40 + 10 «запад», на правой стороне которого зафиксировано растяжение $2{,}4\ x10^{-5}$ при предельном растяжении $3.38x10^{-5}$. Наибольшее значение сжимающих деформаций зафиксировано в сечении ПК40 + 17 «восток», наименьшее - в сечении ПК32 + 75 «восток».

Вертикальные деформации бетона в стенах обделки, измеренные в двух сечениях: ПК68 + 41 «восток» и ПК50 + 80 «запад» - сжимающие, изменяются от $5{,}6x10^{-5}$ до $10{,}8x10^{-5}$.

При анализе деформирования стен обделки правой и левой сторон выявлено: вертикальные деформации на противоположных стенах практически одинаковы, горизонтальные деформации на отдельных пикетах могут отличаться в два раза (ПК40 + 17 «восток») и даже менять знак (ПК40 + 10 «запад»). Можно предположить, что на отдельных участках имеет место изгиб тоннеля в плане с растяжением одной стены и сжатием другой, что может происходить при сжатии тоннеля в продольном направлении.

Продольные деформации путевого бетона в разных точках тоннеля в основном представляют деформации сжатия и изменяются

от -3,6x10^{-5} до -14,0x10^{-5}. Наибольшее значение деформаций сжатия зафиксировано в сечении ПК00+10«восток», наименьшее - в сечении ПК40+17«восток». Деформации растяжения 1,4 x10^{-5} выявлены в сечении ПК40+10 «запад», на южной стороне пути. Деформации бетона справа и слева от пути отличаются незначительно, в пределах точности измерений.

Переход от деформаций к напряжениям сочтен нецелесообразным, так как деформативные характеристики (модуль упругости, коэффициент Пуассона) в условиях сложной пространственной работы и развитии повреждений в материале и конструкциях представляется определить весьма сложным.

Таким образом, анализ продольных деформаций в стенах и путевом бетоне показывает, что тоннель подвержен неравномерному пространственному деформированию. Можно предположить, что вдоль оси действуют продольные силы, создавая области большего сжатия в районе 0 и 40 пикетов восточного участка и области растяжения — в районе западного участка. Общая синхронность деформирования путевого бетон и стен обделки по длине тоннеля совпадает, но на отдельных участках имеет разный характер, что свидетельствует о возможном изгибе тоннеля в плане и разрыве их конструктивных связей.

Положение геометрии колеи систематически проверяется вагоном - путеизмерителем, геодезическими съемками ТОС. Тем не менее, мониторинг деформаций позволяет в прогностическом режиме отслеживать работу конструкций в диапазонах малых деформаций.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Метод фотоупругости // Под ред. Хесина Г.Л. —Т 1.-М.:Стройиздат, 1975. — 460 с.
2. Сахаров В.И., Исайкин А.С., Моргунов А.Н., Старчевский А.В. Фотоупругие датчики деформаций при обследовании конструкций и сооружений //Экспериментальная механика (Хесинские чтения). — М.: Изд-во МГСУ, 2001. — С. 115 - 123.

Дамбаев Ж.Г., Новосельцев В.П., Новосельцев П.В. УДК 631.533.17

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРОГАНИЯ С МЕСТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА

Целью работы является разработка способа экспериментального исследования движения железнодорожного состава и оценка на этой основе тягово-сцепных свойств локомотива.

В основу предлагаемого эксперимента положен метод непосредственного измерения перемещения состава относительно неподвижного объекта, в качестве которого может быть принята цифровая камера, закрепленная на неподвижной опоре. Камера фиксирует положение состава через равные промежутки времени (рис. 1).

Наиболее удобно пользоваться этим способом при изучении процесса трогания с места. В этом случае порядок выполнения эксперимента следующий:

1. укрепляем на локомотиве мерную линейку;
2. выбираем нужный интервал времени на цифровой камере;
3. устанавливаем цифровую камеру на неподвижное основание, так чтобы она находилась против начала шкалы;
4. включаем цифровую камеру с одновременным началом движения локомотива;
5. подключаем цифровую камеру к компьютеру и при его помощи считываем перемещение состава как функцию от времени;
6. заполняем таблицу 1.

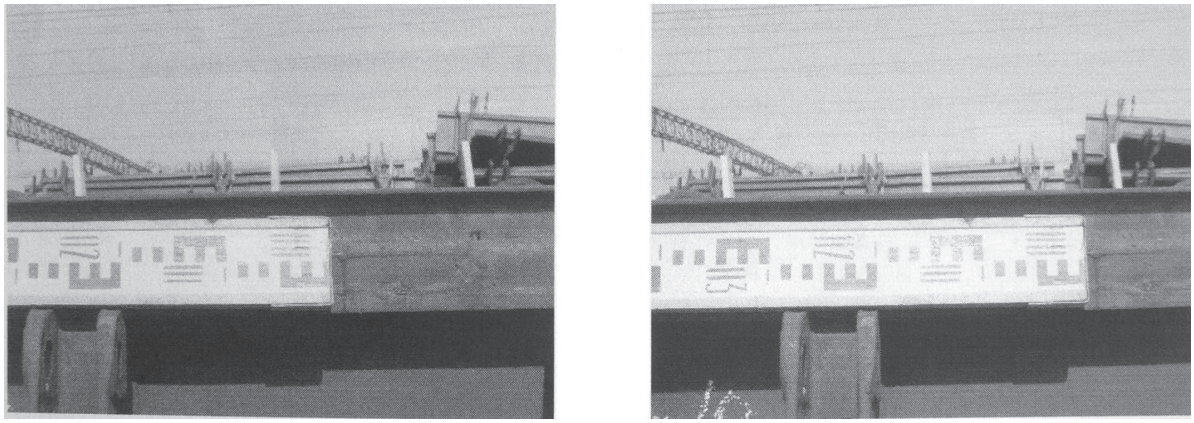


Рис. 1. Снимки процесса трогания с места железнодорожного состава.

При определении скорости и ускорения имеем в виду, что скорость есть производная от закона перемещения т.е.

$$V = \frac{dS}{dt}; \qquad (1)$$

ускорение - производная от скорости

$$a = \frac{dV}{dt}; \qquad (2)$$

сила инерции движущегося состава, массой m

$$P_{ин} = m \cdot a; \qquad (3)$$

сила тяги равна сумме сил сопротивления и инерции

$$P_t = P_{ин} + P_s. \qquad (4)$$

Достоинство предлагаемого метода заключается в том, что он фиксирует абсолютное перемещение состава, позволяет определить его абсолютную скорость и ускорение. Результаты эксперимента могут быть представлены в виде таблицы 1.

Точность измерения параметров движения можно обеспечить соответствующим подбором временного интервала цифровой камеры. В эксперименте, который выполнялся автором, был принят временной интервал $\Delta t = 0{,}5$ секунды. При изучении записи цифровой камеры на компьютере можно, достаточно отчетливо, выделить отрезок δS = 1 мм. Следовательно, абсолютная погрешность измерения перемещения равна δS = 1 мм. = 0,001 м.

Абсолютная погрешность измерения скорости составляет

$$\Delta V = \frac{\delta S}{\Delta t} = \frac{0{,}001}{0{,}5} = 0{,}002 \ м/с. \qquad (5)$$

Средняя скорость перемещения по результатам наших экспериментов равна $V_{ср} = 0{,}54 \ м/с$.

Табл. 1

Результаты эксперимента.

Время, *t*	сек	$t_1 = \Delta t$	$t_2 = 2 \cdot \Delta t$	...	$t_n = n \cdot \Delta t$
Перемещение, *S*	м	S_1	S_2	...	S_n
Приращение перемещения	м	$\Delta S_1 = S_1$	$\Delta S_2 = S_2 - S_1$	...	$\Delta S_n = S_n - S_{n-1}$
Средняя скорость *V* в *i*-том интервале времени	м/с	$V_1 = \frac{\Delta S_1}{\Delta t}$	$V_2 = \frac{\Delta S_2}{\Delta t}$	...	$V_n = \frac{\Delta S_n}{\Delta t}$
Приращение скорости	м/с	$\Delta V_1 = V_1$	$\Delta V_2 = V_2 - V_1$	...	$\Delta V_n = V_n - V_{n-1}$
Среднее ускорение а в *i*-том интервале времени	м/с^2	$a_1 = \frac{\Delta V_1}{\Delta t}$	$a_2 = \frac{\Delta V_2}{\Delta t}$	...	$a_n = \frac{\Delta V_n}{\Delta t}$
Сила инерции в *i*-том интервале времени	Н	$F_{ин1} = a_1 \cdot m$	$F_{ин2} = a_1 \cdot m$	...	$F_{инn} = a_1 \cdot m$
Сила тяги	Н	$F_{t1} = F_{ин1} - W$	$F_{t2} = F_{ин2} - W$	...	$F_{tn} = F_{инn} - W$

Табл. 2

Данные эксперимента трогания с места железнодорожного состава массой 330 тонн.

Время t	сек	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
S	м	0,015	0,061	0,142	0.269	0,453	0,697	0,995	1,342	1,753	2,226	2,76
ΔS	м	0,015	0,046	0,081	0.127	0,184	0,214	0,298	0,347	0,411	0,473	0,534
V	м/с	0,03	0,091	0.161	0,253	0,367	0,489	0,596	0,695	0.821	0,946	1,068
ΔV	м/с	0,03	0,061	0,07	0,092	0,114	0,122	0,107	0,099	0,126	0,125	0,122
a	м/с^2	0,06	0,122	0,14	0.184	0,227	0,245	0,213	0.197	0.252	0,249	0,245
$F_{ин}$	Н	19,8	40,3	46,2	60.72	74.9	80.85	70,3	65.0	83.16	82,17	80,85
$F_{ц}$	Н	26,4	46,9	52,8	67,32	81,5	87,45	76,9	71.6	89.76	88,77	87,45

При этом определены:

- относительная погрешность измерения скорости

$$\delta V = \frac{\Delta V}{V_{ср}} = \frac{0{,}002}{0{,}54} = 0{,}0037 = 0{,}37\%. \qquad (6)$$

- абсолютная погрешность измерения ускорения

$$\Delta a = \frac{\delta V}{\Delta t} = \frac{0{,}002}{0{,}5} = 0{,}004\ м/с^2; \qquad (7)$$

- среднее ускорение

$$a_{ср} = 0{,}2\ м/с^2;$$

- относительная погрешность измерения ускорения

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a_{ср}} = \frac{0{,}004}{0{,}2} = 0{,}02 = 2\%. \qquad (8)$$

На горизонтальном участке пути авторами был выполнен ряд натурных экспериментов трогания с места железнодорожного состава массой 330 тонн, ведомого маневровым тепловозом ТГМ - 23. Результаты этого эксперимента представлены в таблице 2.

По результатам одного из экспериментов, выполненных в номинальном режиме работы тепловоза, построен график перемещения железнодорожного состава (рис. 2). Используя дифференциальные зависимости между перемещением, скоростью и ускорением [2] построим графики изменения скорости (рис.3) и ускорения (рис. 4), где средняя скорость на *i*-ом участке

$$V_i^{ср} = \frac{\Delta S_i}{\Delta t}, \qquad (9)$$

(ΔS_i - приращение перемещения состава на *i* - ом участке; Δt— приращение времени);

среднее ускорение на *i* - ом участке

$$a_i^{ср} = \frac{\Delta V_i}{\Delta t}, \qquad (10)$$

(ΔV_i - приращение скорости на *i* - ом участке; Δt — приращение времени).

На рис. 4 в момент времени $t = 2{,}5$ с, ускорение движения уменьшается, так как происходит проскальзывание колесной пары тепловоза. Сила тяги в этот момент равна

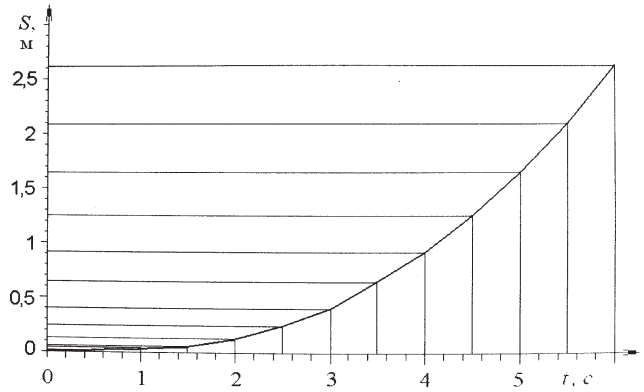


Рис. 2. График перемещения железнодорожного состава.

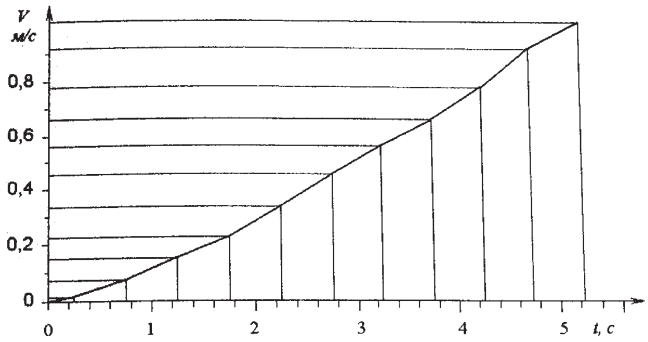


Рис. 3. График изменения скорости железнодорожного состава.

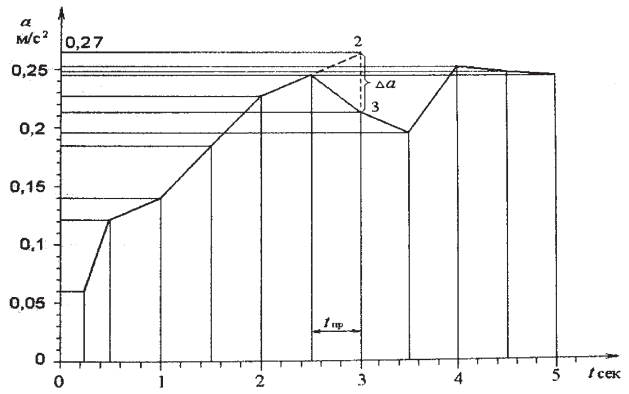


Рис. 4. График изменения ускорения железнодорожного состава.

$$F_t = ma + W = 93000 \text{ Н},$$

где $m = 3{,}3 \cdot 10^5$ кг. - масса состава;

$a = 0{,}245$ м/с^2 - ускорение;

$W = 11\ 800$ Н - сила сопротивления движению. Можно определить также, что коэффициент сцепления

$$f_{сц} = \frac{F_t}{m_Л q} = 0{,}211\ , \qquad (11)$$

где $m_Л q = 440$ кН - сцепной вес локомотива ТГМ-23.

Во время проскальзывания, которое длилось около одной секунды, сила сцепления между колесом и рельсом уменьшалась с 93 кН до 76,5 кН, а коэффициент сцепления уменьшился до 0,17. В дальнейшем сила сцепления восстановилась до уровня 95 кН.

Скорость проскальзывания можно определить, исходя из следующих соображений:

- при отсутствии проскальзывания ускорение в конце третьей секунды было бы равно $a_1 = 0{,}263$ м/с^2;
- фактически из-за проскальзывания оно оказалась равным $a_2 = 0{,}213$ м/с^2;
- скорость проскальзывания $V_{ск} = \Delta a \cdot t$;
- относительная скорость проскальзывания:

$$\frac{V_{ск}}{V} = \frac{0{,}025}{0{,}6} 100\% = 4\%.$$

На рис. 5 показана тяговая характеристика, то есть зависимость касательной силы тяги локомотива от скорости движения состава на самом начальном этапе движения до скорости 0,4 м/с (1,44 км/час), который не охватывается паспортной тяговой характеристикой тепловоза ТГМ-23. Из рисунка 4 видно, что номинальная тяговая характеристика начинается со скорости 0,5 м/с, и при этой скорости обе тяговые характеристики - экспериментальная и паспортная номинальная совпадают. Это дает основание утверждать, что полученная экспериментальная тяговая характеристика близка к номинальной паспортной характеристике. В результате эксперимента получены следующие результаты:

- за первые пять секунд скорость движения достигает 1 м/с (3,6 км/ч);
- сила тяги, создаваемая тепловозом ТГМ - 23 равна $F_К = 100$ кН;

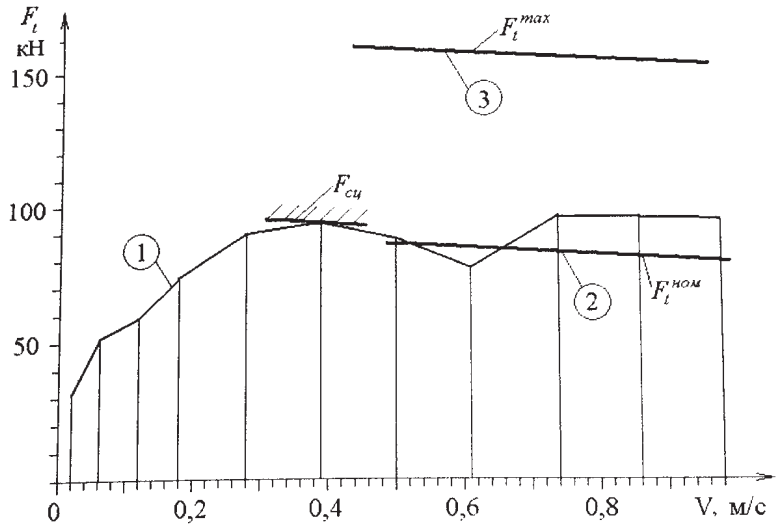


Рис. 5. Тяговая характеристика тепловоза ТГМ-23.
1 - экспериментальная тяговая характеристика при массе состава 330 тонн и силе сопротивления движения 11800 кН; 2 - паспортная тяговая характеристика при номинальном режиме работы тепловоза; 3 - паспортная тяговая характеристика при форсированном режиме работы тепловоза.

-мощность, развиваемая маневровым тепловозом:

$$N = F_к \cdot V = 100 \text{ кВт};$$

- коэффициент сцепления в условиях данного эксперимента: $f_{сц} = 0{,}22$.

Основные выводы.

1. Предлагаемый способ экспериментального исследования процесса трогания с места позволяет получить достоверную и надежную информацию по основным параметрам движения железнодорожного состава, в том числе:

- графики перемещения, изменения скорости и ускорения движения состава;
- силу тяги и ее зависимость от скорости;
- мощность, развиваемую локомотивом;
- коэффициент сцепления между ведущим колесом и рельсом;
- относительную скорость проскальзывания.

2. Этот способ можно рекомендовать для оценки эксплуатационных качеств локомотивов в реальных условиях предприятий железнодорожного транспорта.

3. В настоящей работе предлагалось оценить возможности экспериментального исследования процесса движения железнодорожного состава в момент трогания с места.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Каталог 18-3-78 «Тепловозы СССР» Лист № 19. Москва. НИИИНФОРМ-ТЯЖМАШ 1978 г. - 360 с.
2. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. В.Д. Кузьмича. - М: Издательство «Маршрут», 2005.-448 с.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. - М.:Транспорт, 1985.-287 с.
4. Новосельцев П. В. Разработка тягового транспортного средства для маневровых работ на малодеятельных станциях. Дисс. к.т.н. ОмГУПС. Омск. - 2006. - 196 с.

Печенкина В.В., Арбатская Н.А.

УДК 658.011.56

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Данная работа посвящена моделированию и анализу основных показателей работы железных дорог с целью выбора контролируемых параметров при создании корпоративной системы менеджмента качеством (СМК) ОАО «РЖД». Создание СМК ОАО "РЖД" основывается на международном стандарте для системы управления процессом проверки качества ISO 9000, который объединяет пять стандартов.

1. ISO 9001 - Модель контроля качества в Проектировании, Разработке, Производстве, Монтаже и Обслуживании;
2. ISO 9002 - Модель контроля качества в области Производства, Монтажа и Обслуживания;
3. ISO 9003 - Модель для обеспечения качества при контроле и испытаниях готовой продукции;
4. ISO 9000-1 - Общие руководства по Выбору и Использованию;
5. ISO 9004-2 - Управление качеством и элементы Системы качества - Указания.

ISO 9000 особенно выделяет важность использования статистических методов в системе управления качеством. Основные принципы SPC (Статистический Контроль Процесса) просты для понимания и легко применимы. Из девяти базовых требований, предъявляемых к производственному процессу стандартом ISO 9000, можно выделить следующие:

1. **Корректирующие и упреждающие действия**, которые должны основываться на любых жалобах потребителей, ошибках в обслуживании, записях по качеству и т.д. Создание карт контроля качества позволяет выявить изменения основных (ключевых) показателей

работы и упредить возможные отклонения процесса работы от нормы в режиме реального времени. Упреждение - это главная цель контроля качества и стандартов ISO.

2. **Статистические методы.** Документация по системе качества должна включать в себя исчерпывающее руководство по использованию соответствующих методов, карт и статистик. Данный раздел говорит о том, что организация должна устанавливать статистические методы для подтверждения возможности работы и достижения требуемых показателей и характеристик этой работы.

3. **Регистрация данных о качестве.** Организация должна регистрировать данные о качестве параметров обслуживания, проводить внутренние проверки, анализировать, предпринимать корректирующие и предупреждающие действия. Данные о качестве должны быть точно определены, зафиксированы и храниться в легкодоступном месте.

Принятая, в настоящее время, в ОАО"РЖД" форма отчетности основывается на десяти группах основных показателей работы, характеризующих определенные свойства технологического процесса перевозок. Анализу и моделированию данных показателей, с целью установления закономерностей их изменения, выявления независимых и зависимых показателей, прогнозирования изменения поведения и определения более обобщенных показателей контроля качества, в соответствии с требованиями ISO, и посвящена данная работа. Следует отметить, что в этом направлении проведены определенные исследования в работе [1]. Но данная работа в основном посвящена определению коэффициентов корреляции показателей работы и проведению корреляционного анализа. В действительности, в соответствии с требованиями стандарта ISO 9000, анализ и моделирование изменения показателей работы железных дорог должно осуществляться системно, по следующим двум направлениям.

1) Анализ данных того или иного показателя на существование грубых ошибок в значениях данных (например превышение какого либо значения в несколько раз по сравнению со средним) и корректировка данных значений. Использование значений показателя без корректировки может привести к неверным расчетам и выводам.

2) Проведение корреляционно - регрессионного анализа для установления влияния различных показателей перевозочной работы (объемные показатели, качественные показатели, состояние железнодорожного пути, финансово-экономические показатели) на основные финансово-экономические показатели (доходы от перевозок, расходы от перевозок, себестоимость перевозок и производительность труда работников, занятых на перевозках). Выявление зависимых и независимых показателей с целью уменьшения их количества и установления основных (ключевых) показателей. Нахождение уравнений регрессии зависимостей основных финансово-экономических показателей от различных показателей перевозочной работы для выявления изменения основных (ключевых) показателей работы и упреждения возможныхи отклонений процесса работы от нормы, оптимизации значений и, в конечном счете, создания карт контроля качества.

Рассмотрим данные направления анализа на примерах ряда показателей работы некоторых железных дорог. Следуя первому пункту, можно привести пример (рис. 1) очень большего всплеска значения (октябрь 2003 г.) показателя производительности труда работников, занятых на перевозках (тыс. привед. ткм.) Красноярской железной дороги — 729,6, по сравнению со значениями в сентябре и ноябре соответственно — 147,3 и 210,7. Такое же наблюдается на Западно-Сибирской, Восточно-Сибирской и Забайкальской дорогах, что нельзя сказать о других дорогах. Естественно предположить, что данные показатели требуют либо тщательной проверки, или приведены с ошибкой, которая существенно может повлиять на расчеты характеристик и привести к неправильным выводам. В данном случае, значение за октябрь целесообразнее всего заменить на среднее значение показателя по всем месяцам — 168,7. Или, например, значение по-

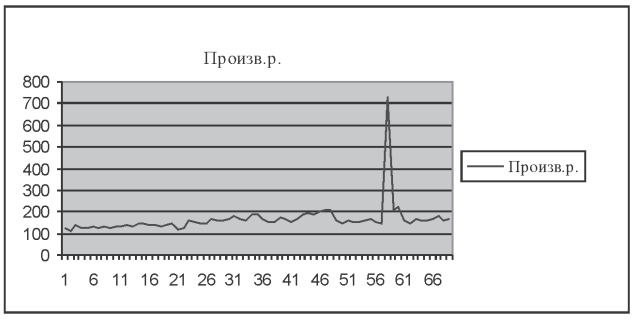


Рис. 1. Производительности труда работников, занятых на перевозках.

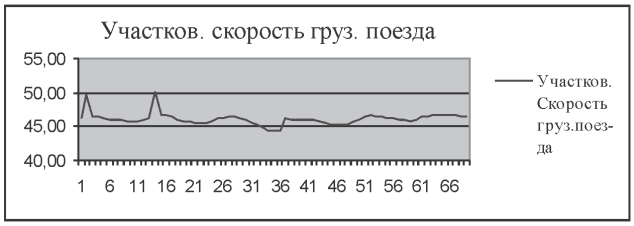


Рис. 2. Изменение средней участковой скорости движения грузового поезда во всех видах тяги (км/ч.) для Красноярской железной дороги.

казателя — грузооборот (млн. ткм.) за декабрь 2000 г. — 7844,0 значительно по сравнению с ноябрем — 5265,0 и январем — 4804,0. Необходимо указать и на такой пример. Средняя участковая скорость движения грузового поезда во всех видах тяги (км/ч.) по всем дорогам значительно превышает в феврале 1999 и 2000 годах по сравнению с другими месяцами, в другие годы значение данного показателя в феврале сопоставимо со значениями показателя в другие месяцы. Данное значение показателя может быть рассчитано с ошибкой из-за разницы количества дней в феврале месяце и других месяцах, и требует уточнения и дальнейшей корректировке. На рис.2 приведен пример изменения данного показателя для Красноярской железной дороги. Пики значений соответствуют февралю 1999 и 2000 годам.

Приведенные примеры лишний раз подтверждают, что при создании СМК ОАО "РЖД" одно из базовых требований стандарта ISO 9000 — **регистрация данных о качестве**, которое определяется правильной регистрацией данных о качестве, проведением внутренней проверки, анализом, принятием корректирующих и предупреждающих действий, имеет не менее важное значение по сравнению с другими требованиями.

На втором шаге моделирования осуществляется построение многофакторной корреляционно-регрессионной модели.

Разработка модели и исследование экономических процессов должны выполняться по следующим этапам[2]:

1. отбор главных факторов;
2. оценка функции регрессии;
3. проверка адекватности модели;
4. экономическая интерпретация;
5. прогнозирование неизвестных значений зависимой переменной.

Рассмотрим подробнее содержание некоторых этапов.

Выбор главных факторов - основа для построения многофакторной корреляционно-регрессионной модели. Много факторов неудобно для анализа, и модель будет неустойчива. Мало факторов - тоже плохо. Это может привести к ошибкам при принятии решений в ходе анализа модели. Поэтому необходимо выбирать более рациональный перечень факторов. При этом проводят анализ факторов на мультиколлинеарность.

Мультиколлинеарность - попарная корреляционная зависимость между факторами. Мультиколлинеарная зависимость присутствует, если коэффициент парной корреляции $r_{ij} \geq 0{,}70 - 0{,}80$. Отбор переменных, подлежащих исключению, производится с помощью коэффициентов парной корреляции. Опыт показывает, что если $|r_{xy}| \geq 0{,}70$, то одну из переменных можно исключить, но какую переменную исключить из анализа, решают исходя из управляемости факторов на уровне предприятия.

Обычно в модели оставляют тот фактор, на который можно разработать мероприятие, обеспечивающее улучшение значения этого фактора в планируемом году.

Процедура отбора главных факторов обязательно включает следующие этапы.

1. Анализ факторов на мультиколлинеарность и ее исключение. Здесь производится анализ значений коэффициентов парной корреляции r_{ij} между факторами x_i и x_j

2. Анализ тесноты взаимосвязи факторов (x) с зависимой переменной (y).

Факторы, для которых $r_{xy} \approx 0$ *т. е. не связанные с y,* подлежат исключению в первую очередь. Факторы, имеющие наименьшее значение r_{xy} могут быть потенциально исключены из модели. Вопрос об их окончательном исключении решается в ходе анализа других статистических характеристик.

Этапы 1, 2, 3 могут осуществляться применением системы Excel с помощью встроенных функций "Корреляция" и "Регрессия".

Полученное уравнение регрессии применяют при прогнозировании и оптимизации. Прогноз получают путем подстановки в регрессию численных значений факторов. Следует подчеркнуть, что прогнозирование результатов регрессии лучше поддается содержательной интерпретации, чем простая экс-

траполяция тенденций, так как полнее учитывается природа исследуемого явления.

На основе вышеизложенного была получена многофакторная корреляционно-регрессионная модель зависимости финансово-экономического показателя "доходы от перевозок" от некоторых объемных, качественных и финансово-экономических показателей эксплуатационной работы Красноярской железной дороги. В качестве факторов были взяты следующие показатели: погрузка грузов общая (тыс.т.), грузооборот (млн. ткм.), среднесуточный пробег вагона грузового парка (км), простой грузового вагона под одной грузовой операцией (ч), простой грузового вагона на одной технической станции (ч), средний вес поезда брутто в грузовом движении, все виды тяги, (т), среднесуточная производительность локомотива в грузовом движении, (тыс. ткм. брутто), себестоимость перевозок (коп. за 10 привед. ткм), среднесписочная численность работников (тыс. чел.). В результате расчета попарно корреляционной зависимости с помощью встроенной функции "Корреляция" программы Excel и проведения анализа на мультиколлинеарность (в связи с большой коррелированностью с остальными показателями) были отброшены следующие факторы: простой грузового вагона на одной технической станции (ч), среднесуточный пробег вагона грузового парка (км), среднесуточная производительность локомотива в грузовом движении, (тыс. ткм. брутто), погрузка грузов общая (тыс.т.). В виду большой коррелированности себестоимости перевозок со средним весом поезда в грузовом движении ($r_{ij} = 0{,}9377$) оставляем средний вес поезда, так как он легче управляем на уровне дороги, чем себестоимость, хотя коэффициент корреляции себестоимости и доходов немного больше (0,94), чем коэффициент корреляции среднего веса поезда и доходов (0,938). В результате получим корреляционную таблицу (табл.1) для оставшихся факторов.

В результате расчета регрессии по Excel получим модель в виде

$$Y_d - 4775{,}5 + 0{,}07x_1 - 20{,}89x_2 + 1{,}945x_3 - 15{,}16x_4,$$

где факторы: x_1 - грузооборот (млн. ткм.), x_2 - простой грузового вагона под одной грузовой операцией (ч), x_3 - средний вес поезда брутто в грузовом движении, все виды тяги, (т), x_4 - среднесписочная численность работников (тыс. чел.).

Аналогично была получена зависимость себестоимости (Y_c) от среднесуточного пробега вагона грузового парка (x_1), численности работников (x_2) и грузооборота (x_3) в виде

$$Y_c = 50{,}74 + 1{,}51x_1 - 7{,}89x_2 + 0{,}003x_3$$

В данном случае в результате анализа на мультиколлинеарность были отброшены такие факторы, как погрузка грузов общая (тыс.т.), простой грузового вагона под одной грузовой операцией (ч), простой грузового вагона на одной технической станции (ч), средний вес поезда брутто в грузовом движении, все виды тяги, (т), среднесуточная производительность локомотива в грузовом движении, (тыс. ткм. брутто), доходы от перевозок (млн.руб.).

Табл. 1

Корреляционная таблица для основных факторов.

	Доходы всего	Грузооборот	Простой вагона под одной груз. операц.	Средн. вес поезда	Числ. раб. основн. деятел.
Доходы всего	1				
Грузооборот	0,551734	1			
Простой вагона под одной груз. операцией.	-0,67206	-0,44438	1		
Средний вес поезда	0,938273	0,453895	-0,57159	1	
Числ. работников основной деятельност.	-0,58793	-0,07378	0,259283	-0,63541	1

Аналогично предыдущему был проведен анализ зависимости производительности труда работников, занятых на перевозках (тыс. привед. ткм) от объемных и качественных показателей эксплуатационной работы (погрузка грузов общая, грузооборот, среднесуточный пробег вагона грузового парка, простой грузового вагона под одной грузовой операцией, простой грузового вагона на одной технической станции, средний вес поезда брутто в грузовом движении, все виды тяги, среднесуточная производительность локомотива в грузовом движении) и финансово-экономических показателей (доходы от перевозок, расходы от перевозок, прибыль (убытки) от перевозок, себестоимость перевозок, среднесписочная численность работников, производительность труда работников, занятых на перевозках, среднемесячная заработная плата, дебиторская задолженность). Что интересно, после проведения анализа факторов на мультиколлинеарность и анализа тесноты взаимосвязи факторов (x) с зависимой переменной (y - производительность) были получены две корреляционно-регрессионные модели для рассмотрения (с учетом корректировки одного из значений грузооборота упомянутого выше).

$$Y_p = 19{,}91 + 0{,}00256x_1 + 0{,}0258x_2,$$

где x_1 - среднемесячная заработная плата, x_2 - грузооборот, или

$$Y_p = -192{,}89 + 0{,}071x_1 + 0{,}021x_2,$$

где x_1 - средний вес поезда брутто в грузовом движении, x_2 - грузооборот.

Объясняется это тем, что парная корреляция между среднемесячной заработной платой и средним весом поезда значительна. Все остальные показатели отброшены, так как либо имеют большую корреляцию с показателями - среднемесячная заработная плата, средний вес поезда брутто в грузовом движении, грузооборот, либо малую корреляцию с производительностью.

В заключении следует отметить, что применение методов корреляционно-регрессионного анализа позволяет построить модели зависимостей основных финансово-экономических показателей от главных факторов объемных, качественных и финансово-экономических показателей эксплуатационной работы. Проведенный анализ позволит уменьшить число основных показателей работы железных дорог, а полученные уравнения регрессии могут быть применены при прогнозировании и оптимизации показателей перевозочной работы.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Информационный справочник по основным показателям работы железных дорог (2002/2003г.г.). ЦНИИТЭИ МПС — М.:2004. - 516 с.
2. Супрун В.Н., Лакин И.К. Системный анализ показателей работы железных дорог как исходных данных систем менеджмента качества — Красноярск: Изд-во "Гротеск", 2005, 52 с.
3. Бережная Е.В., Бережной В.И. Математические методы моделирования экономических систем: Учебное пособие. — М.: Финансы и статистика, 2001. — 368 с.

Соколова О.В., Марынич Д.С.

УДК 725.3

ВЛИЯНИЕ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

Весьма распространенным классом деформаций в зимний период в регионах с сезонным промерзанием, а также распространения вечномерзлых грунтов является пучение. При деформации земляного полотна, вследствие развития процессов морозного пучения, возможно искажение положения рельсовых нитей, что приводит к угрозе безопасности движения поездов. При текущем содержании пути необходимо выдавать предупреждения о снижении скоростей движения поездов и в суровых зимних условиях производить

выправку искажаемого пути укладкой специальных пучинных карточек и подкладок (по несколько раз за зимний сезон), а весной извлекать эти подкладки из пути. Работы эти трудоемкие, выполняются многими ПЧ железных дорог Севера, Урала, Сибири, Дальнего Востока, требуют расхода миллионов деревянных подкладок (и тыс. $м^3$ леса), пучинных костылей, при многих перешивках разрушаются шпалы, увеличивается выход рельсов, элементов подвижного состава, поэтому так важна проблема предупреждения и ликвидации пучин. Пучинные деформации развивается в зимний период в процессе морозного пучения земляного полотна. Морозное пучение происходит как следствие увеличения в объеме глинистых грунтов при промерзании за счёт замерзания воды, находящейся в грунте, и мигрирующей в зону промерзания из смежных талых слоев с образованием кристаллов, линз и прослоек льда в очагах кристаллизации (вода при замерзании увеличивается в объеме на 9%).

Суть процесса морозного пучения заключается в том, что в зимний период земля с поверхности промерзает на некоторую глубину, а весной оттаивает. Этот сезоннопромерзающий слой называется деятельным слоем. С этим слоем и связано морозное пучение грунтов. Сезонное промерзание грунтов колеблется в широких пределах от нескольких десятков сантиметров в южных областях и до 3-4 м в северных в восточных регионах страны. Темпы сезонного промерзания различны. На севере скорость сезонного промерзания 1-5 см в сутки. Полное промерзание достигается уже в ноябре - декабре. В южных районах сезонное промерзание происходит в течение всей зимы.

При промерзании грунта происходит поднятие или опускание земляного полотна, в результате этого наблюдается изменение положения рельсовых нитей по уровню и в продольном профиле сверх установленных допусков.

Морозное пучение обуславливается тремя основными факторами:

- наличием в зоне промерзания пучинистых (обычно пылеватых, суглинистых, супесчаных) грунтов;

- избыточным увлажнением пучинистых (в том числе некоторых видов заторфованных и иловатых) грунтов с влажностью выше порога пучения;

- промерзанием этих избыточно увлажненных пучинистых грунтов (при наличии градиента температур) на глубину 1,5...3 м и более в районах Сибири, БАМа.

Пучинами (деформациями) называются местные неровности (искажения) пути по рельсовым нитям в продольном и поперечном профилях, которые больше допустимых по нормам текущего содержания и возникают при морозном пучении в период сезонного промерзания и оттаивания земляного полотна.

Соответственно равномерное пучение — такое, при котором возникающие при морозном пучении неровности пути в продольном и поперечном профилях не превосходят допустимые в фазах формирования, роста и осадки пучинных неровностей $\left(i_{ср} \le i_{Д}\right)$.

Важным фактором, определяющим выпучивание грунта, является его влажность в предзимний период. При этом выделяют два начальных условия пучения, которые определяются предельными значениями влажности. Влажность предела пучения характеризует такое предельное влажностное состояние, когда в замерзающем грунте воздушные поры заполняются льдом и незамерзающей водой, но пучение отсутствует. Другое предельное значение влажности, называемое критическим,— миграция влаги навстречу фронту промерзания грунта. Критическая влажность зависит от влажности на границе пластичности.

Согласно данным, содержащимся в работах, выпучивание грунта зависит от его температуры. Э. А. Маров исследовал деформации пучения свободной поверхности грунта и среднезимнюю температуру по глубине основания в зависимости от условий промерзания грунта. В первую зиму площадка очищалась от снежного покрова, во вторую зиму снег не убирался. В результате при разности температур грунта в первую и вторую зиму, составившую около 1°, подъем поверхности грунта уменьшился в 2—3 раза.

Температура грунта влияет также на силы смерзания грунта с фундаментами, которые рекомендуется принимать равными предельным значениям касательных сил пучения. Существует несколько методов определения сил смерзания модели сваи с грунтом путем её продавливания в мерзлом грунте. М. Н.

Гольдштейн, Н. И. Салтыков, Н. А. Цытович и др. справедливо заметили, что мгновенная прочность смерзания, которая получается при сдвиге модели сваи относительно мерзлого грунта, не может служить критерием сил пучения, так как при этом не учитывается релаксация напряжений при длительном действии нагрузки . М. Н. Гольдштейн разработал метод определения сил пучения путем оценки предела длительной прочности, которая зависит от характера загружения. В предложенной установке вмороженная свая перемещалась в мерзлом грунте с постоянной скоростью под действием нагрузки, равной силе сопротивления смерзания.

Установлено, что температура грунта зависит от температуры воздуха, времени, коэффициентов теплообмена на поверхности грунта, его влажности и плотности. Что касается деформаций пучения грунта, то они зависят от значительного количества взаимосвязанных параметров, различные сочетания которых порой приводят к прямо противоположным результатам. Так, увеличение глубины промерзания обычно сопровождается возрастанием выпучивания грунта. Но при этом следует учитывать влияние скорости промерзания во времени, температуру грунта и мощность промерзающей толщи.

Различают пучинные горбы, перепады и впадины- прямые, переносные, односторонние. Несколько пучин, следующих одна за другой, образуют пучинный участок. Железнодорожный путь на пучинах нуждается в неоднократных выправках согласно действующим нормам в зависимости от скорости движения поездов. Промерзание земляного полотна возникает в следствии неоднородности или различной увлажненности промерзающих грунтов, наличие бессточных неровностей на основной площадке, близкого залегания грунтовых вод, необеспеченности поверхностного водоотвода, несвоевременной очистки балластного слоя.

Морозное пучение грунтов обусловлено климатическими, гидрогеологическими и литологическими факторами. К основным природным факторам, характеризующим интенсивность пучения грунтов, относятся гранулометрический, минералогический и химический состав грунта, его водно-физические свойства, а также режим увлажнения и охлаждения грунтов, зависящий от климатических и гидрогеологических условий площадок.

Пучинистыми обычно называют грунты, которые при промерзании в условиях естественного залегания способны увеличится в объеме.

К пучинистым грунтам относят пески мелкие и пылеватые, супеси, суглинки и глины, а так же крупнообломочные грунты с содержанием в виде заполнителя частиц размером менее 0,1 мм. В количестве более 30 %, если они промерзают в условиях достаточного увлажнения или возможного притока вод по капиллярам.

К не пучинистым грунтам относят скальные, крупнообломочные с содержанием частиц грунта диаметром менее 0,1 мм меньше 30 %, пески гравелистые, крупные и средней крупности.

Следует заметить что подразделение грунтов на пучинистые и непучинистые условно, так как один и тот же грунт в одних условиях может быть пучинистым, а в других-непучинистым. Поэтому более правильно говорить о пучинистом или непучинистом состоянии грунтов.

Причинами неравномерного пучинообразования могут быть:

- наличие деформаций в виде балластных углублений (балластных корыт, лож, просадок);
- неоднородный литологический состав грунтов по глубине и простиранию (в продольном и поперечном профилях);
- неравномерное увлажнение грунтов в зоне промерзания атмосферными осадками, в том числе при неисправных водоотводах;
- наличие и различный гидрологический режим грунтовых вод в зоне промерзания;
- неравномерная и неодинаковая величина промерзания пучинистых грунтов (из-за снежного покрова, конструктивных особенностей и др.)

В соответствии с причинной обусловленностью, местоположением слоя пучинообразования в зоне промерзания, источников увлажнения (атмосферными, грунтовыми водами) пучины классифицируются по типам:

- поверхностные, формируются на контакте с загрязненным балластным слоем, углублениями;
- грунтовые:
- верховые (I типа) при размещении слоя пучинообразования, а также деформацией в верхней части зоны промерзания;

- полной зоны промерзания (II типа), когда слоем пучинообразования служит вся зона промерзания;

- низовые (III типа), когда слой пучинообразования размещен в нижней части зоны промерзания.

Коренные пучины, предопределяются избыточным увлажнением грунтовых вод.

Следует выделить наледные пучины (горбы), возникающие при сужении живого сечения водотока грунтовых вод в зоне промерзания и отслаивании вышележащих слоев грунта над льдообразованиями.

Весной возможны пучинные просадки - местные резкие впадины при оттаивании пучинистых грунтов, вызывающие недопустимые искажения положения рельсовых нитей, возможны на участках равномерного пучения.

Нами были исследованы деформации морозного пучения в крупнообломочных грунтах с пылевато-глинистым заполнителем. Эти грунты широко распространены в природе и часто являются природным основанием при прокладке железных дорог. Практика показывает, что наибольшему пучению подвергаются грунты, дисперсность которых соответствует размерам пылеватых частиц от 0,05 до 0,005 мм.

Одним из свойств, наиболее влияющих на пучение, является влажность, а именно, влагосодержание грунта на момент промерзания. Установлено два независящих друг от друга показателя, определяющих начальные условия пучения грунта по влажности (Орлов, др., 1977):

$$W > W_{pr}\,;\ W > W_{cr}.$$

Первый показатель — влажность предела пучения W_{pr} — характеризует предельно влажностное состояние, при котором в замерзающем грунте воздушные поры заполняются льдом и незамерзшей водой, но пучение отсутствует. Расчетная влажность пучения находится по формуле:

$$W_{pr} = 0{,}92\frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s \rho_d} + 0{,}8 K_\omega T_{up} W_p,$$

где ρ_s — плотность твердых частиц грунта, г/см^3;

ρ_d — плотность сухого грунта, г/см^3;

$K_щ$ — коэффициент содержания незамерзшей воды в мерзлом грунте;

T_{up} — температура прекращения пучения грунта, ^{0}С;

W_p — влажность на границе раскатывания, д.ед.

Второй показатель-критическая влажность W_{c2} — характеризует влажностное состояние, при котором в замерзшем грунте содержание воды практически не влияет на ее подвижность в нижележащем слое:

$$W_{c2} = \frac{1}{2\rho_s}\left(\sqrt{\rho^2}_{\varpi} + 3\rho_s W_L(\rho_\omega + \rho_s W_L)e^{-2,8J_p} - \rho_\omega\right),$$

где ρ_s — плотность твердых частиц грунта, г/см^2;

W_L - влажность на границе текучести, д.ед.;

J_p — число пластичности, д.ед.

Изменение влажности грунта в процессе промерзания значительно влияет на величину пучения грунта. В настоящее время предложено более двух десятков теорий миграции влаги. Наибольшее распространение получила теория адсорбционно-пленочного механизма влагопереноса, согласно которой перемещение влаги к фронту промерзания осуществляется за счет частичного «вымерзания» пленочной воды на минеральном скелете грунта, высвобождение части поверхности энергии грунтовых частиц и подтягивания абсорбционными силами дополнительного количества влаги. Пучение с точки зрения миграционного льдонакопления зависит от скорости промерзания.

Пучение промерзающих грунтов оказывает отрицательное воздействие на различные сооружения, но наибольшие осложнения приносит земляному полотну автомобильных и железных дорог, а также аэродромным покрытиям. При большом скорости движения железнодорожного транспорта на участках пучин возникают деформации верхнего строения пути (пучинные горбы), ухудшается взаимодействие пути и подвижного состава, что может привести к сходу подвижного состава. Поэтому в целях безопасности и плавности движения поездов устанавливаются ограничение скорости.

Морозное пучение грунтов нередко приводит к выпучиванию из пород деятельного слоя на поверхность крупных твердых тел, находящихся в слое сезонного промерзания.

Нормальные силы пучения. Эти силы пучения действуют по нормали к основанию фундаментов и возникают за счет формирования линз льда под фундаментом. Меры борь-

бы: подошву фундамента следует заглублять ниже подошвы слоя сезонного промерзания на 0,25 м. Следовательно, глубина заложения фундамента определяется глубиной сезонного промерзания.

Касательные силы пучения. Пазуха котлована обычно заполняется тем же, но только разрыхленным грунтом. Влажность засыпаемого грунта обычно больше естественной влажности грунта в массиве. В результате смерзания фундамента с прилегающим грунтом развиваются касательные силы пучения. Таким образом, касательные силы морозного пучения являются результатом действия грунтов, замерзающих у боковых граней фундаментов, и имеют направление по касательной к поверхности фундаментов, соприкасающихся с замерзающим грунтом. Наибольшей прочностью смерзания обладают водонасыщенные мерзлые пески. Наименьшую силу смерзания имеют щебенистые, гравелистые и галечниковые грунты.

Изучение деформации железнодорожного полотна, развивающийся от действия сил морозного пучения охватывает влияния всего комплекса природной обстановки на развитие процесса пучения. Основными критериями оценки морозоопасности крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем являются критерии дисперсности, степень заполнения межобломочного пространства тонкодисперсными частицами, влажность, характеризующая предел пучения крупнообломочного грунта, а также его критическая влажность.

Критерий дисперсности характеризует степень раздробленности грунта и определяется по формуле (Орлов и др., 1977):

$$D = \frac{k}{\overline{d}_o^{\,2} \cdot e \cdot \rho_\omega}$$

где k — коэффициент, равный $1{,}85 \times 10^{-4}$;

$\rho_щ$ — плотность сухого крупнообломочного грунта;

e — коэффициент пористости;

d_o — средний диаметр частиц грунта, см.

Плотность сложения крупнообломочного грунта выражается через степень заполнения межобломочного пространства тонкодисперсными частицами, которая для грунта, находящегося в сухом состоянии равна

$$S_з = \frac{(1-K_р)\cdot \rho_{d\,ког} \cdot \rho_{s\,об}}{\rho_{s\,з} \cdot (\rho_{s\,об} - K_р\, \rho_{d\,ког})},$$

где $K_р$ — весовое содержание частиц > 2 мм;

$\rho_{d\ ког}$ — плотность сухого крупнообломочного грунта;

$\rho_{s\ об}$ и $\rho_{s\ з}$ — плотность обломков и тонкодисперсных частиц соответственно.

Для влажного грунта этот показатель определяется с учётом объёма заполненного водой. Влажностное состояние крупнообломочных грунтов характеризуется влажностью предела пучения и критической влажностью.

Проанализировав результаты лабораторных и натурных исследований, мы получили зависимость степени морозоопасности крупнообломочного грунта с пылевато-глинистым заполнителем от пучинистых свойств тонкодисперсного материала

$$R_f = S_з R_{f.з},$$

где $R_{f.з}$ — параметр морозоопасности тонкодисперсного грунта;

$S_з$ - степень заполнения мелкообломочного пространства тонкодисперсными частицами.

Оценка морозоопасности земляного полотна из крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем с учётом перечисленных критериев позволяет оценивать их степень пучинистости и составлять прогноз деформации основания сооружений.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Грицык В.И. Земляное полотно железных дорог. — М.: Маршрут,- 2005. - 362 с.
2. Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. — Л.: Стройиздат. -1977. - 412 с.
3. Соколова О.В., Горковенко Н.Б. Оценка морозоопасности крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем. - Основания, фундаменты и механика грунтов — 1997. №2. - С.11-15.

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

Раздел 2.

Управление в технических системах. Моделирование.

Содержание научного журнала:

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

Елисеев С.В., Засядко А.А., Упырь Р.Ю. УДК 621.01

НОВЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В СТРУКТУРНЫХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В работах [1,2] рассматриваются последовательное соединения звеньев соединения звеньев (Рис.1) S_1 и S_2, для которых имеют место соотношения

$$S = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2}, \qquad (1)$$

где S_1 и S_2 - передаточные функции типовых звеньев структуры [2] или комплексные сопротивления [1].

Если рассматривать точку соединения (2) (рис.1) таким образом, что в ней входят в контакт элементы двух звеньев (точки ($2^{/}$) и ($2^{//}$)), то между точками ($2^{/}$) и ($2^{//}$) можно ввести новое звено — рычаг, так, как это показано на рис.2.

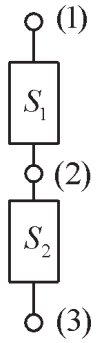


Рис.1. Схема последовательного соединения

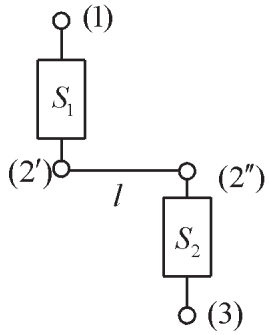


Рис.2. Последовательное соединение звеньев с разнесенными точками контакта ($2^{/}$) и ($2^{//}$), l - длина рычага.

Рычаг может быть безынерционным звеном [1], а в некоторых случаях можно принимать во внимание его массоинерционные свойства. Невесомый рычаг без точки опоры создает в передаче взаимодействия определенный хаос, который можно при некоторых ограничениях рассматривать как люфт. Однако, для рычага можно ввести точки опоры, полагая, что тем самым в схему взаимодействия вводится рычаг либо первого, либо второго рода. Точка опоры рычага может быть связана с неподвижной системой отсчета (рис.3а, б).

Если сравнить соединения на рис.1 и рис.3*а,б*, то можно отметить, что они будут различными. Продолжая рассмотрение возможностей введения такого типа рычажного соединения, можно сделать предположение о «закреплении» точки опоры на одном из элементов системы, который входит в общую схему. И, наконец, можно рассматривать вид соединения рычагом, у которого «точка опоры» будет скользящей. Подобные ситуации, по-существу, возникает при колебаниях твердого тела в виде балки, расположенного на двух опорах. В этом случае могут быть использованы специальные системы координат [1].

I. На рис.4а представлен один из вариантов введения рычажного звена (рычаг 1-го

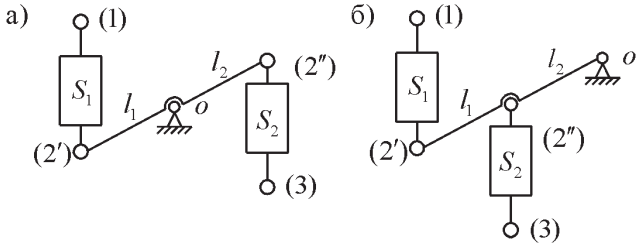


Рис.3. Рычаг первого рода (а) и рычаг второго рода (б) в соединении типовых звеньев.

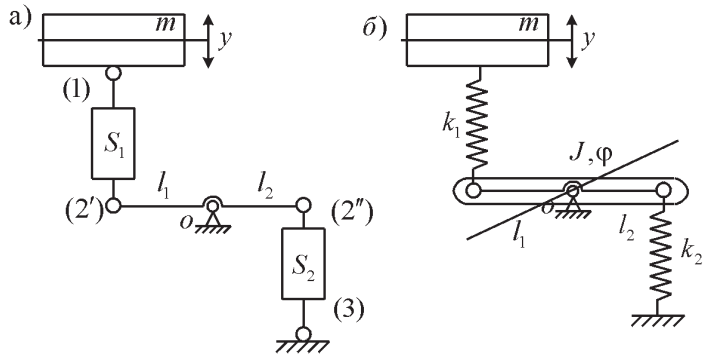


Рис.4. Расчетные схемы последовательного соединения S_1 и S_2 через рычажное звено: а) общий случай; б) S_1 и S_2 являются упругими элементами.

рода), а на рис.4б — показана расчетная схема, включающая упругие и массовые элементы, обеспечивающие включение связки S_1, S_2 в колебательную систему.

Предлагая общий способ учета свойств «рычажного» соединения, будем полагать, что рычаг обладает моментом инерции J и может совершать угловые движения φ. Используя уравнение Лагранжа II рода и полагая, что сила P приложена к массе, получим уравнения движения в виде

$$\begin{cases} m\ddot{y} + k_1 y - k_1 l_1 \varphi = P, \\ J\ddot{\varphi} + (k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2)\varphi - k_1 l_1 y = k_2 l_2. \end{cases} \quad (1)$$

Структурная схема системы показана на рис.5, она состоит из двух парциальных подсистем, обозначенных контурами I и II, связанных между собой упругими связями. Если принять $J = 0$ (то есть рычаг будет невесомым), тогда при учете

$$\varphi = y\frac{k_1 k_2 l_1^2}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2},\ i = \frac{l_2}{l_1}, \quad (2)$$

получим

$$my + \ddot{y}\frac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2} = 0. \quad (3)$$

Из (3) следует, что дополнительное соединение в виде рычага первого рода, имеющее передаточный коэффициент i, эквивалентно введению в систему новой пружины, но уже с другой упругостью - $k_2 i^2$. Соответствующая расчетная схема показана на рис.6а,б,в; откуда можно увидеть что введение рычага не меняет характера изначального соединения, элементы взаимодействуют последовательно в соответствии с (1), но рычаг формирует новое свойство, которое определяется уже приведенной жесткостью.

Если $i = 1$, то введение рычага не изменяет приведенной жесткости, но позволяет «разнести» в пространстве точку соединения двух элементов k_1 и k_2. При $i = 0$($l_2 = 0$) — исходная система вырождается, также как при $i = \infty$ ($l_1 = 0$). Таким образом пределы изменения i определяются условиями $0 < i < \infty$ (но $i \neq 0$ и $i \neq \infty$).

Используя схему, приведенную на рис.4б произведем некоторые преобразования ($J = 0$)

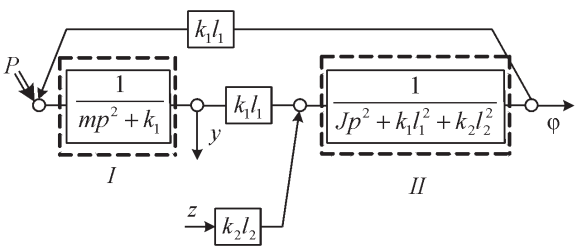


Рис.5. Структурная схема системы, приведенной на рис.4б.

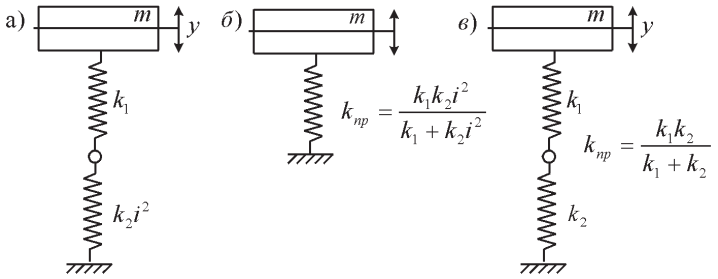


Рис.6. Расчетная схемы к системе, приведенной на рис.4а: а) последовательное соединение при введении рычага (i); б) приведенная расчетная схема при введении рычага (i); в) расчетная схема обычного последовательного соединения.

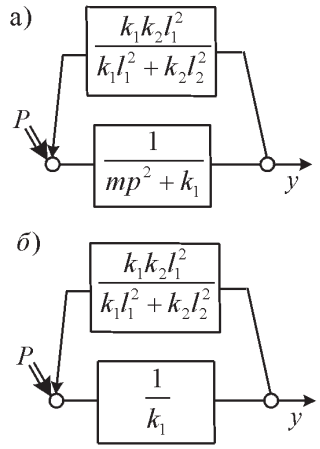


Рис.7. Структурная схема системы на рис.4а: а) с учетом рычажных свойств и $m \neq 0$; б) с учетом рычажных свойств и $m = 0$.

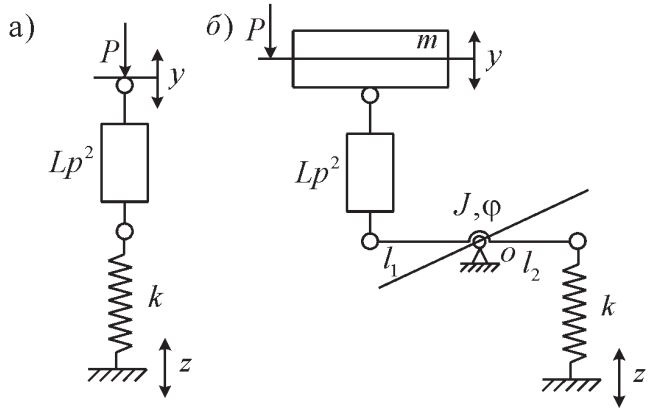


Рис.8. Последовательное соединение устройства для преобразования движения (Lp^2) и пружины (k).

и получим структуру (рис.7), позволяющую найти приведенную жесткость.

Для случая на рис.7а найдем передаточную функцию системы при выходе y и входе P:

$$\overline{W} = \frac{\overline{y}}{\overline{P}} = \frac{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}{m_1 p^2 + \dfrac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2}}, \qquad (4)$$

откуда следует

$$K_{\text{пр}} = \frac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2}. \qquad (5)$$

Если использовать структурную схему на рис.7б, то можно также найти передаточную функцию, соответствующую отношению выхода y и входа P, что имеет вид

$$\overline{W} = \frac{\overline{y}}{\overline{P}} = \frac{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}{k_1 k_2 l_2^2} = \frac{1}{k_{\text{пр}}}, \qquad (6)$$

где $K_{\text{пр}} = \dfrac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2}$.

Отметим, что структурная схема на рис.7а является (по терминологии, введенной Гальпериным И.И. в работе [3]), кинетостатической моделью, а структурная схема на рис.7б соответствует статической схеме, то есть является статической моделью. Результаты, полученные в двух подходах, совпадают, а свойства рычага не зависят от частотных свойств системы.

Приведенная жесткость может быть получена на основе обычных подходов, как это делается в теории колебаний (например, в работе [1]), однако надо принять во внимание, что при введении рычага, происходит переход в другой класс систем, где необходимо учитывать моментные соотношения, углы поворота, моменты сил (именно этим объясняется появление i^2, а не i).

II. Если положить, что $S_1 = Lp^2$, а $S_2 = k$ что соответствует схеме на рис.8а, то расчетная схема с введением массы m и кинематического возмущения Z имеет вид, как показано на рис.8б. Полагая, что кинетическая и потенциальная энергия системы определяется выражениями

$$T = \frac{1}{2} m\dot{y}^2 + \frac{1}{2} L(\dot{y} - l_1\dot{\varphi})^2 + \frac{1}{2} J\dot{\varphi}^2,$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k(\varphi l_2 - z)^2, \qquad (7)$$

получим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m\ddot{y} + L\ddot{y} - Ll_1\ddot{\varphi} = P, \\ J\ddot{\varphi} + Ll_1^2\ddot{\varphi} - Ll_1\ddot{y} + kl_2^2\varphi = kl_2 z, \end{cases} \qquad (8)$$

и построим структурную схему (рис.9).

Используя структурную схему (рис.9), найдем передаточные функции системы

$$\overline{W} = \frac{\overline{y}}{\overline{P}} = \frac{(J + Ll_1^2)p^2 + kl_2^2}{(m+L)p^2\left[(J + Ll_1^2)p^2 + kl_2^2\right] - L^2 l_1^2 p^4}. \qquad (9)$$

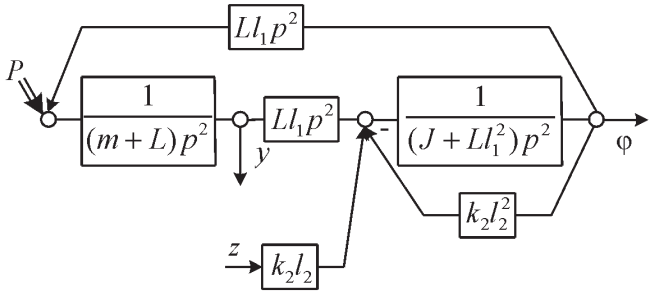


Рис.9. Структурная схема системы, приведенной на рис.8б.

Если $J=0$, а затем $m=0$, то получим соответственно

$$\overline{W}'=\frac{\overline{y}}{\overline{P}}=\frac{Ll_1^2p^2+kl_2^2}{(m+L)p^2\left[Ll_1^2+kl_2^2\right]-L^2l_1^2p^4}, \quad (10)$$

$$\overline{W}''=\frac{\overline{y}}{\overline{P}}=\frac{Ll_1^2p^2+kl_2^2}{Lp^2\cdot kl_2^2}. \quad (11)$$

Полагая, как и ранее, что $i=\frac{l_2}{l_1}$, найдем

$$\overline{W}_{\text{пр}}=\frac{\overline{y}}{\overline{P}}=\frac{Lp^2ki^3 2}{Lp^2+ki^2}. \quad (12)$$

Отметим, что этот результат можно было получить сразу, если принять $S_1=Lp^2$, $S_2=k$, тогда

$$\overline{W}_{\text{пр}}=\frac{\overline{y}}{\overline{P}}=\frac{Lp^2k}{Lp^2+k}, \quad (13)$$

но в этом случае не было бы принято во внимание рычажное соединение.

Передаточная функция от входа Z на выход y, что соответствует не силовому, а кинематическому воздействию, имеет вид

$$\overline{W}=\frac{\overline{y}}{\overline{Z}}=\frac{Ll_1^2p^2+kl_2^2}{(m+L)p^2\left[Ll_1^2p^2+kl_2^2\right]-L^2l_1^2p^4}. \quad (14)$$

Знаменатель (14) — частотное уравнение, совпадает со знаменателем (11), что и следовало ожидать, поэтому $\overline{W}_{\text{пр}}$, определенное из (14) будет также соответствовать выражению (12). Аналогичным образом могут быть апробированы взаимодействия любых других наборов из типовых звеньев [2].

III. Использование для разноса точек ($2'$) и ($2''$) рычага 2-го рода показано на рис.10а,б.

Система дифференциальных уравнений в этом случае имеет вид

$$\begin{cases} m\ddot{y}+k_1y-k_1l\varphi=P, \\ J\ddot{\varphi}+\varphi(k_1l_1^2+k_2l_2^2)-k_1ly=k_2l_2z. \end{cases} \quad (15)$$

Используя структурную схему (рис.10б), найдем, что

$$\overline{W}=\frac{\overline{y}}{\overline{P}}=\frac{Jp^2+k_1l^2+k_2l_2^2}{(mp+k_1)\left(Jp^2+k_1l^2+k_2l_2^2\right)-k_1^2l^2}; \quad (16)$$

$$\overline{W}=\frac{\overline{\varphi}}{\overline{P}}=\frac{k_1l}{A}; \quad (17)$$

$$\overline{W}=\frac{\overline{\varphi}}{\overline{Z}}=\frac{(mp+k_1)k_2l_2}{A}; \quad (18)$$

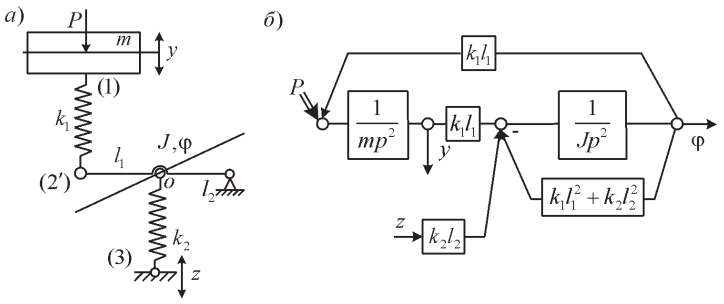


Рис.10. Расчетная (а) схема и структурная схема колебательной системы (б) с рычагом второго рода.

$$\overline{W}=\frac{\overline{y}}{\overline{Z}}=\frac{k_1k_2l\ l_2}{A}, \quad (19)$$

где $A=(mp+k_1)\left(Jp^2+k_1l_1^2+k_2l_2^2\right)-k_1^2l^2$.

Если $J=0$ и $m=0$, то

$$K_{\text{пр}}=\frac{k_1k_2i^2}{k_1+k_2i^2}, \quad (20)$$

где $i=\frac{l_2}{l}=\frac{l_2}{l_1+l_2}$.

Таким образом, рычаг второго рода, определяя приведенную жесткость, которая формируется как последовательное соединение пружины k_1 и k_2 с точками ($2'$) и ($2''$), разнесенными безынерционным рычагом второго рода, дает выражение такого же типа, что и выражение (5).

При этом, если $i=1$, то рычаг не вносит ничего особенного по сравнению с обычным последовательным соединением. Если $i=0$, то и $l_2=0$, что соответствует соединению k_2 с неподвижной точкой и соединение становиться невозможным. Если $i>0$, то физически это означает перенос точки ($2''$) влево, что не изменит качественной картины результатов.

Таким образом, использование безынерционного рычага первого или второго рода для разноса точек соединения элементов S_1 и S_2 (точки ($2'$) и ($2''$)), не меняет типа соединения, то есть последовательный тип соединения остается, однако выражение для приведенной характеристики соединения будет включать передаточные коэффициенты рычага. Получение приведенных характеристик, получаемых из комбинации типовых звеньев, можно получать из передаточных функций, так называемых статических систем [2], хотя аналогичные результаты можно получить, используя частотные уравнения (знаменатель передаточной

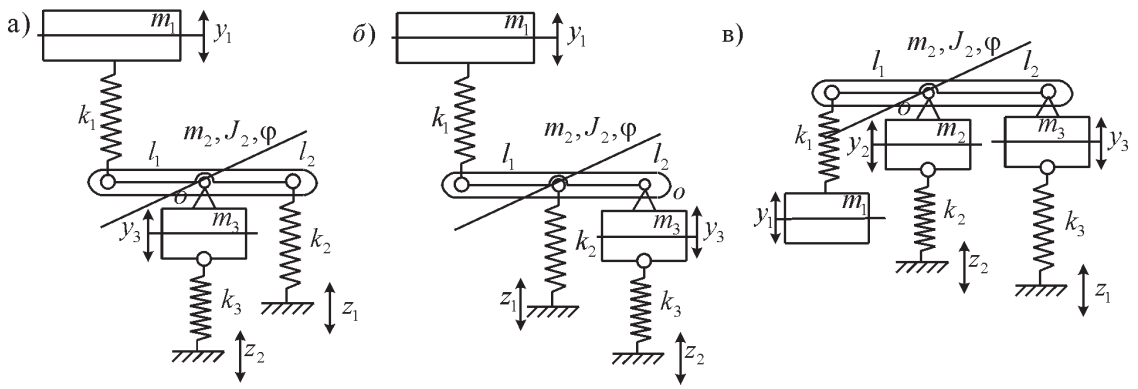


Рис.11. Расчетные схемы колебательных систем с рычагами, точки опоры которых принадлежат другим элементам (во всех вариантах точка опоры помещается на элемент массы): (а) опора на элементе массой m_3; (б)опора на элементе массой m_3; (в) опора на элементе массой m_2.

функции), делая соответствующие преобразования. Учет инерционных свойств рычажного соединения представляет собой отдельную задачу и требует соответствующей физической интерпретации.

IV. Рычажная связь может быть реализована и в том случае, когда точка опоры принадлежит одному из элементов общей схемы, например, это может быть элемент массы или точка опоры, котрая принадлежит элементу S_3. В этом случае вторая точка может примыкать к неподвижному основанию или соединяться с другими элементами. Примеры системы такого рода приведены на рис.11а,б,в.

Для случая, показанного на рис.11а, запишем выражения для кинетической и потенциальной энергии

$$\left.\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}J_2\left(\frac{\dot{y}_3}{l_1}\right)^2 + (m_2+m_3)\dot{y}_3^2, \\ \Pi &= \frac{1}{2}k_1(y_1 - l_1\varphi - y_3)^2 + \frac{1}{2}k_2(l_2\varphi + y_3)^2 + \\ &\quad + \frac{1}{2}k_3(y_3 - Z_2)^2. \end{aligned}\right\} \quad (21)$$

и соответствующую систему дифференциальных уравнений движения

$$\begin{cases} m\ddot{y}_1 + k_1y_1 - k_1l\varphi + k_1y_3 = P_1, \\ J_2\ddot{\varphi} + \varphi(k_1l_1^2 + k_2l_2^2) + k_1l_1y_1 - y_3(k_1l_1 - k_2l_2) = \\ \qquad = k_2l_2Z_1, \\ (m_2+m_3)\ddot{y}_3 + y_3(k_1+k_2+k_3) + k_1y_1 - \varphi(k_1l_1 - k_2l_2) = \\ \qquad = k_2l_2Z_1 + k_3Z_2 + P_3. \end{cases} \quad (22)$$

Структурная схема системы приведена на рис.12. В системе уравнений (22) учтены возможные виды возмущений (силовые и кинематические), что также нашло отражение на структурной схеме - рис.12*а*. На рис.12*б* представлена дуальная механическая цепь, построенная по правилам, изложенным в работе [1].

Отметим, что в данной системе имеются связи k_1, которые превращают систему в непланарную. Приняв $\varphi = y_2$, перепишем систему (22) в виде

$$\begin{aligned} a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + a_{13}y_3 &= b_1, \\ a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + a_{23}y_3 &= b_2, \\ a_{31}y_1 + a_{32}y_2 + a_{33}y_3 &= b_3, \end{aligned} \quad (23)$$

и определим соответствующие коэффициенты:

$$\begin{aligned} &a_{11} = m_1p^2 + k_1,\ a_{12} = -k_1l_1,\ a_{13} = k_1,\ a_{21} = -k_1l_1, \\ &a_{22} = Jp^2 + k_1l_1^2 + k_2l_2^2, a_{23} = -\left(k_1l_1 - k_2l_2\right), \\ &a_{31} = k_1,\ a_{32} = -\left(k_1l_1 - k_2l_2\right), \\ &a_{33} = \left(m_2 + m_3\right)p^2 + k_1 + k_2 + k_3, \\ &b_1 = P_1,\ b_2 = k_2l_2z_1,\ b_3 = k_2l_2z_1 + k_3z_2 + P_3. \end{aligned} \quad (24)$$

Не прибегая к построению передаточных функций, запишем, используя метод определителей [1], частотное уравнение системы в виде:

$$\begin{aligned} B = a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{21}a_{32} + a_{12}a_{21}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} + \\ + a_{11}a_{23}a_{31} - a_{13}a_{22}a_{31}. \end{aligned} \quad (25)$$

Будем полагать, что рычаг безынерционный ($J_2 = 0$) и $m_2 + m_3 = 0$, тогда

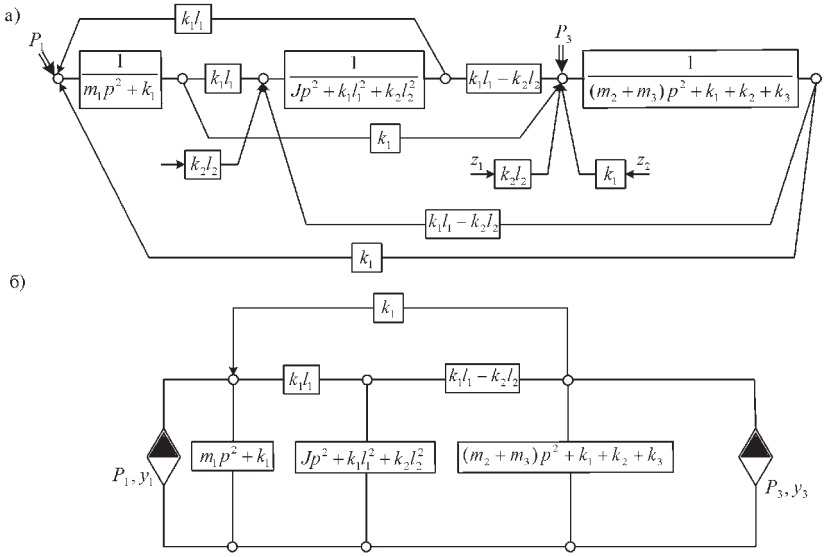


Рис.12. Структурная схема (а), соответствующая расчетной схеме, приведенной на рис.11а (P_1, P_3 - силовые возмущения, Z_1, Z_2 - кинематические возмущения) и ее дуальная механическая цепь (б).

$$B = m_1 p^2[(k_{1_1^2} + k_2 l_2^2)(k_1 + k_2 + k_3) - (k_1 l_1 - k_2 l_2)^2 - -(k_1 l_1 - k_2 l_2)] + k_1(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2)(k_1 + k_2 + k_3) - -k_1(k_1 l_1 - k_2 l_2)^2 + k_1^2 l_1(k_1 l_1 - k_2 l_2) - k_1^2 l_1^2(k_1 + k_2 + k_3) - -k_1^2(k_1 l_1 - k_2 l_2) - k_1^2(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2). \quad (26)$$

При $k_1 l_1 - k_2 l_2 = 0$ выражение (26) упростится и примет вид:

$$B = m_1 p^2[(k_{1_1^2} + k_2 l_2^2)(k_1 + k_2 + k_3) + + k_1(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2)(k_1 + k_2 + k_3) - -k_1^2 l_1^2(k_1 + k_2 + k_3) - k_1^2(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2). \quad (27)$$

Разделим (27) на $(k_{1_1^2} + k_2 l_2^2)(k_1 + k_2 + k_3)$, что соответствует переводу этого члена в структуру числителя передаточной функции, тогда получим

$$B = m_1 p^2 + k_1 - \frac{k_1^2 l_1^2}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2} - \frac{k_1^2}{k_1 + k_2 + k_3} \quad (28)$$

или

$$B = m_1 p^2 + \frac{k_1 k_2 l_1^2}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2} - \frac{k_1}{k_1 + k_2 + k_3}. \quad (29)$$

После введения $i = \frac{l_2}{l_1}$ найдем, что

$$B = m_1 p^2 + k_{\text{пр}} - \frac{k_1^2}{k_1 + k_2 + k_3}, \quad (30)$$

где $k_{\text{пр}} = \frac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2}$.

Учитывая то, что нами было принято условия $k_1 l_1 - k_2 l_2 = 0$, полагая $k_1 = k_2 \frac{l_2}{l_1} = k_2 i$, получим

$$\frac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2} = \frac{k_1^2}{k_1 + k_2 + k_3}. \quad (31)$$

Из соотношения (30) можно получить, что при условии $k_1 l_1 - k_2 l_2 = 0$, упрощенная система ($J_2 = 0$, $m_2 + m_3 = 0$) с рычагом, у которого $i >> 1$, возникает режим квазинулевой жесткости, если выполняется

$$k_3 = k_2(i - 1). \quad (32)$$

Таким образом, безынерционный рычаг, в схеме с промежуточной опорой на упругий элемент, реализует эффект образования приведенной характеристики по формулам (5), (14). Если на схеме (рис.11а) полагать $k_3 = \infty$, то результат в этом частном случае совпадает с расчетами на схеме, соответствующей рис.4б.

V. При учете инерционных свойств рычага, не имеющего фиксированной точки поворота, рассмотрим схему балочного типа, как показано на рис 13.

Запишем для системы, приведенной на рис.13, выражения для кинетической и потенциальной энергии

$$T = \frac{1}{2} M\dot{y}^2 + \frac{1}{2} J\dot{\varphi}^2, \quad \Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2, \quad (32)$$

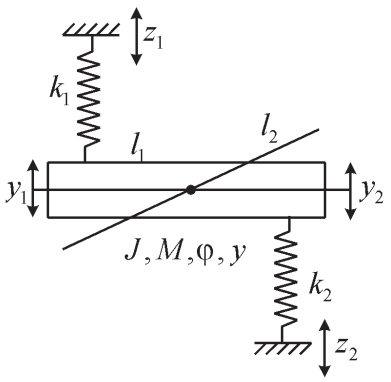


Рис.13. Расчетная схема последовательного соединения $S_1 = k_1$ и $S_2 = k_2$ при рычаге с учетом его инерционных свойств.

и введем ряд необходимых соотношений:

$\varphi = \dfrac{y_2 - y_1}{l_1 + l_2}$; $y = \dfrac{y_2 l_1 - y_1 l_2}{l_1 + l_2}$; $y_1 = y - l_1\varphi$; $y = y_1 + l_1\varphi$; $y = y_2 + l_2\varphi$.

Тогда

$$T = \frac{1}{2}M(a_1\dot{y}_1 + a_2\dot{y}_2)^2 + \frac{1}{2}Jb_1^2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2,$$

или

$$T = \frac{1}{2}M(a_1^2\dot{y}_1^2 + 2a_1a_2a_2\dot{y}_1\dot{y}_2 + a_2^2\dot{y}_2^2) + \\ + \frac{1}{2}Jb_1^2(\dot{y}_2^2 - \dot{y}_2\dot{y}_1 + \dot{y}_1^2).$$

Для получения дифференциальных уравнений движения систем используем уравнения Лагранжа 2-го рода

$$\begin{cases} Ma_1\ddot{y}_1 + Jb_1^2\ddot{y}_1 + Ma_1a_2\ddot{y}_1 - Jb_1^2\ddot{y}_1 + k_1y_1 = k_1z_1, \\ Ma_2\ddot{y}_2 + Jb_1^2\ddot{y}_2\varphi + Ma_1a_2\ddot{y}_1 - Jb_1^2\ddot{y}_1 + k_2y_2 = k_2z_2. \end{cases} \quad (33)$$

Структурная схема, соответствующая расчетной схеме на рис.13 имеет вид в соответствии с рис.14, откуда может быть получена передаточная функция системы

$$\frac{y_2}{Z_1} = \frac{k_1}{\aleph_1 \cdot \aleph_2 - (Ma_1a_2 - Jb_1^2)^2 p^4}, \quad (34)$$

где

$$\aleph_1 = (Ma_1^2 + Jb_1^2)p^2 + k_1,$$
$$\aleph_2 = (Ma_2^2 + Jb_1^2)p^2 + k_2.$$

Сделаем ряд предположений: $M \neq 0$ и $J = 0$, но предварительно найдем частотное уравнение

$$B = (Ma_1^2 + Jb_1^2)(Ma_2^2 + Jb_1^2)p^4 + p^2k_1(Ma_2^2 + Jb_1^2) + \\ + p^2k_2(Ma_1^2 + Jb_1^2) + k_1k_2 - p^4(Ma_1a_2 - Jb_1^2)^2,$$

которое после некоторых преобразований примет вид:

$$B = p^4MJb_1(a_1 + a_2)^2 + p^2[k_1(Ma_2^2 + Jb_1^2) + \\ + k_2(Ma_1^2 + Jb_1^2)] + k_1k_2. \quad (35)$$

Если $J = 0$, то

$$B = p^2M[k_1a_2^2 + k_2a_1^2] + k_1k_2, \quad (36)$$

или

$$B = p^2M + \frac{k_1k_2}{k_1a_2^2 + k_2a_1^2}, \quad (37)$$

где

$$a_1 = \frac{l_2}{l_1 + l_2},\ a_2 = \frac{l_1}{l_1 + l_2},\ k_1a_2^2 = \frac{k_1l_1^2}{(l_1 + l_2)^2},$$
$$k_2a_1^2 = \frac{k_2l_2^2}{(l_1 + l_2)^2}. \quad (38)$$

Подставим (37) в (36) и после некоторых преобразований, приняв $i = \dfrac{l_2}{l_1 + l_2}$, найдем:

$$B = p^2M + \frac{k_1k_2}{k_1 + k_2i^2} + \frac{2k_1k_2i}{k_1 + k_2i^2} + \frac{k_1k_2i^2}{k_1 + k_2i^2} = \\ = p^2M + \frac{k_1k_2(1+i)^2}{k_1 + k_2i^2}. \quad (39)$$

Анализируя (39) можно говорить о приведенной характеристике и для весомого рычага с $J = 0$, но $M \neq 0$. В этом случае получим:

$$k_{пр} = \frac{k_1k_2}{k_1} + k_2i^2 + \frac{2k_1k_2i}{k_1 + k_2i^2} + \frac{k_1k_2i^2}{k_1 + k_2i^2} = \\ = \frac{k_1k_2i^2}{k_1 + k_2i^2} + \frac{k_1k_2(1+2i)}{k_1 + k_2i^2}, \quad (40)$$

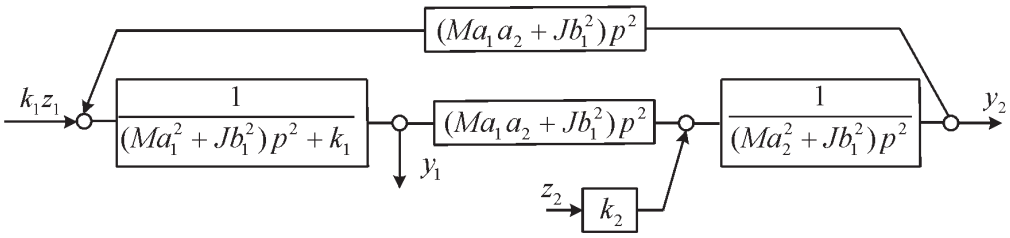


Рис.14. Структурная схема системы, приведенной на рис.13.

откуда следует, что в выражении для приведенной жесткости появляется еще одна компонента

$$\frac{k_1 k_2 (1+2i)}{k_1 + k_2 i^2}. \qquad (41)$$

Если $k_1 = k_2 = k$, $a_1 = a_2 = 1/2$, $i = \frac{l_2}{l_1} = 1$, то

$$k_{\text{пр}} = 2k. \qquad (42)$$

В этом частном случае последовательное соединение упругих элементов вырождается в параллельное.

Будем полагать, что $M = 0$ и $J \neq 0$, тогда получим, что

$$B = p^2 J[k_1 b_1^2 + k_2 b_1^2] + k_1 k_2. \qquad (43)$$

где

$$b_1 = \frac{1}{l_1 + l_2},\ k_1 b_1^2 = \frac{k_1}{(l_1 + l_2)^2},\ k_2 b_1^2 = \frac{k_2}{(l_1 + l_2)^2}. \qquad (44)$$

Подставим (44) в (43) и после некоторых преобразований, приняв $i = \frac{l_2}{l_1}$, найдем

$$B = p^2 J + \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}(l_1 + l_2)^2 = p^2 J + k_{посл}(l_1 + l_2)^2. \qquad (45)$$

$$k_{\text{пр}} = k_{\text{посл}}(l_1 + l_2)^2. \qquad (46)$$

Система дифференциальных уравнений движения в обобщенных координатах y, φ для системы, приведенной на рис.13, имеет вид

$$\begin{cases} M\ddot{y} + y(k_1 + k_2) - \varphi(k_1 l_1 - k_2 l_2) = k_1 z_1 + k_2 z_2, \\ J\ddot{\varphi} + y(k_1 + k_2) - \varphi(k_1 l_1^2 - k_2 l_2^2) = k_1 l_1 z_1 + k_2 l_2 z_2. \end{cases} \qquad (47)$$

Соответствующая структурная схема системы приведена на рис.15, откуда может быть определена передаточная функция

$$\overline{W} = \frac{\overline{\varphi}}{\overline{Z}_1} = \frac{(Mp^2 + k_1 + k_2)c_1 l_1 + k_2(k_1 l_1 - k_2 l_2)}{(Mp^2 + k_1 + k_2)(Jp^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) - (k_1 l_1 - k_2 l_2)^2}, \qquad (48)$$

для которой частотное уравнение имеет вид

$$B = (Mp^2 + k_1 + k_2)(Jp^2 + k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) - (k_1 l_1 - k_2 l_2)^2. \qquad (49)$$

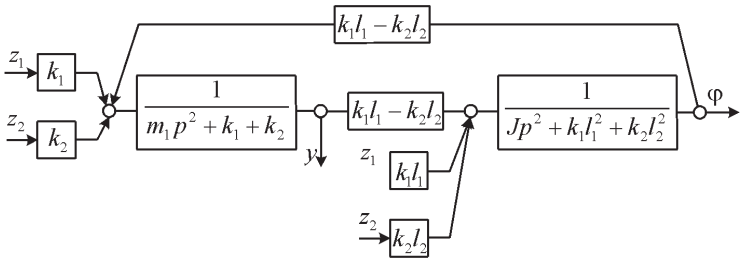


Рис.15. Структурная схема системы, приведенной на рис.13.

Если принять, что $J = 0$, то выражение (49) упростится до:

$$B = Mp^2(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) + k_1(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) - k_2(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) - k_1^2 l_1^2 + 2k_1 k_2 l_1 l_2 - k_2^2 l_2^2. \qquad (50)$$

Произведя некоторые преобразования, получим приведенной коэффициент жесткости

$$k_{\text{пр}} = \frac{k_1 k_2 l_2^2}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2} + \frac{2k_1 k_2 l_1 l_2}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2} + \frac{k_1 k_2 l_1^2}{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}, \qquad (51)$$

или

$$k_{\text{пр}} = \frac{k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2} + \frac{2k_1 k_2 i^2}{k_1 + k_2 i^2} + \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2 i^2}, \qquad (52)$$

где $i = \frac{l_2}{l_1}$.

Из анализа (52) следует:

- если $l_2 = 0$, то $i = 0$ и $k_{\text{пр}} = k_2$;
- если $i = 1$, то $k_{\text{пр}} = \frac{4k_1 k_2}{k_1 + k_2 i^2} = 4k_{\text{посл}}$;
- если $k_1 = k_2 = k$, то если $i = 1$ - $k_{\text{пр}} = 2k$;
- если $i = \infty$ - $k_{\text{пр}} = k_1$.

Возвращаясь к выражению (35), запишем, что

$$B = p^4 MJb_1(a_1 + a_2)^2 + p^2[k_1(Ma_2^2 + Jb_1^2) + k_2(Ma_1^2 + Jb_1^2)] + k_1 k_2.$$

Откуда, обозначив $\frac{J}{M} = \gamma$ и разделив на b_1^2 найдем

$$B = p^4 MJb_1 + p^2 M[k_1 \frac{a_2^2}{b_1^2} + \gamma k_1 + k_2 \frac{a_1^2}{b_1^2} + \gamma k_2] + k_1 k_2, \qquad (53)$$

где $a_1 = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$, $a_2 = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$, $b_1 = \frac{1}{l_1 + l_2}$. (54)

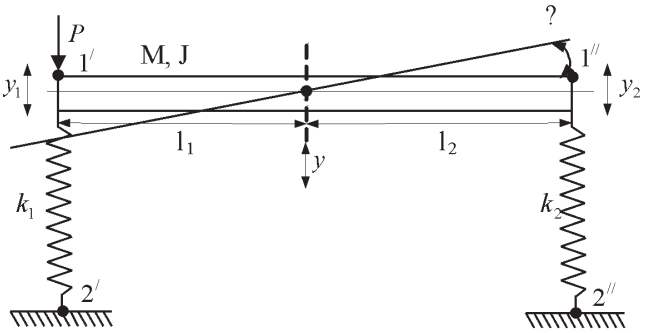


Рис.16. Расчетная схема системы (балка на двух опорах).

Подставив (54) в (53) и произведя преобразования, получим

$$B = p^4 MJb_1 + p^2 M[k_1\left(l_1^2 + \gamma\right) + \\ + k_1\left(l_1^2 + \gamma\right)] + k_1 k_2. \quad (55)$$

Откуда найдем полное (учитывающее массоинерционные свойства рычага) значение $k_{\text{пр}}$:

$$k_{\text{пр}} = \frac{k_1 k_2 (1+i)^2}{k_1 + k_2 i^2 + \dfrac{J}{Ml_1^2}\left(k_1 + k_2\right)}, \quad (56)$$

где $i = \dfrac{l_2}{l_1}$.

Обозначим $\dfrac{J}{Ml_1^2} = \theta$, тогда выражение (56) примет вид -

$$k_{\text{пр}} = \frac{k_1 k_2 (1+i)^2}{k_1 + k_2 i^2 + \theta\left(k_1 + k_2\right)}. \quad (57)$$

VI. Для оценки свойств рычага с точкой опоры, совпадающей с траекторией движения центра масс, рассмотрим систему, представленную на рис.16.

Запишем уравнения для кинетической и потенциальной энергии в системе обобщенных координат y, φ

$$T = \frac{1}{2} J\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} M\dot{y}^2, \quad (58)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y - l_1\varphi)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y + l_2\varphi)^2.$$

Используя формализм Лагранжа 2-го рода, получим уравнения движения системы

$$J\ddot{\varphi} + \varphi(k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2) - y(k_1 l_1 - k_2 l_2 = 0, \\ M\ddot{y} + y(k_1 + k_2) - \varphi(k_1 l_1 - k_2 l_2) = 0. \quad (59)$$

и построим соответствующую расчетной схеме (рис.16) структурную схему, как показано на рис.17

Запишем также выражения для кинетической и потенциальной энергии в системе координат y_1, y_2

$$T = \frac{1}{2} Ja^2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2} M(a_1 \dot{y}_1 + a_2 \dot{y}_2)^2, \\ \Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 y_2^2, \quad (60)$$

где $a^2 = \dfrac{1}{\left(l_1 + l_2\right)^2}$, $a_1 = \dfrac{l_2}{l_1 + l_2}$, $a_2 = \dfrac{l_1}{l_1 + l_2}$.

Используя аналогичные приемы, получим соответствующие уравнения движения системы

$$Ja^2 \ddot{y}_1 - Ja^2 \ddot{y}_2 + Ma_1^2 \ddot{y}_1 - Ma_1 a_2 \ddot{y}_2 + k_1 y_1 = 0, \\ Ja^2 \ddot{y}_2 - Ja^2 \ddot{y}_1 + Ma_2^2 \ddot{y}_2 - Ma_1 a_2 \ddot{y}_1 + k_2 y_2 = 0, \quad (61)$$

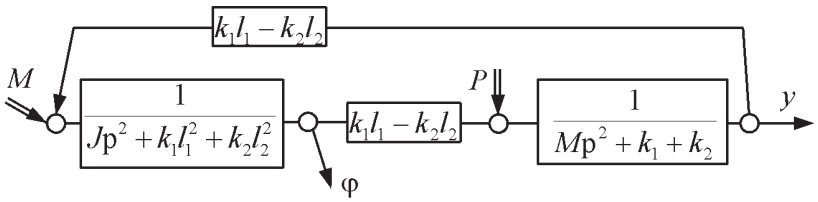


Рис.17. Структурная схема системы в системе координат *y*, φ.

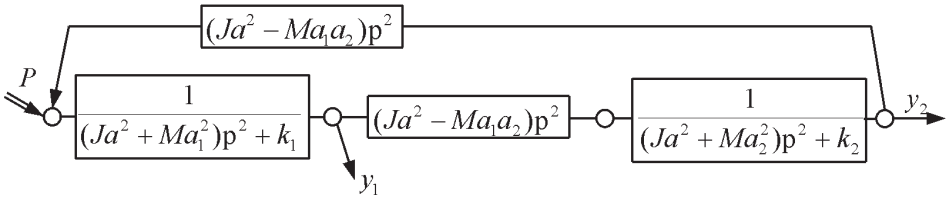


Рис.18. Структурная схема системы, представленной на рис.16 в системе координат y_1, y_2.

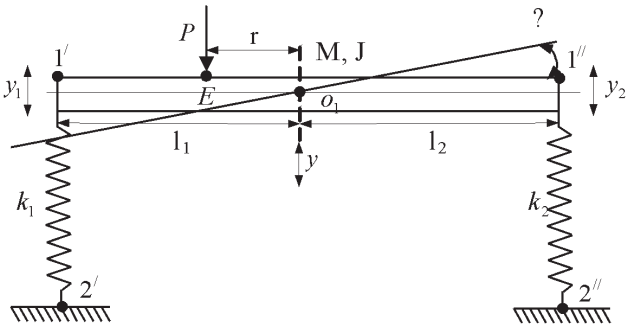


Рис.19. Расчетная схема для определения силовых нагрузок в точка (1′) и (1″).

а структурная схема системы примет вид, показанный на рис.18.

Передаточная функция системы запишется в виде

$$\frac{y_1}{P}=\frac{(Ja^2+Ma_1^2)p^2+k_2}{\rho_4+\rho_2+k_2(Ja^2+Ma_1^2)+k_1k_2}, \quad (62)$$

где

$$\rho_4=p^4(JMa^2a_1^2+JMa^2a_2^2),$$

$$\rho_2=p^2(k_1(Ja^2+Ma_1^2),$$

откуда найдем частотно уравнение системы:

$$p^4(JMa^2a_1^2+JMa^2a_2^2)+p^2(k_1(Ja^2+Ma_1^2)+ +k_2(Ja^2+Ma_1^2)+k_1k_2. \quad (63)$$

Если принять $J=0$, $M=0$, то прикладывая силу P в точке $(1')$ мы имеем только одну пружину k_1. Тоже самое получим, если сила P приложена в точке $(1'')$, тогда параллельное соединение вырождается в пружину k_2.

Таким образом, если обычное параллельное соединение подвергается процедуре «разноски» и вместо точек (1) и (2) вводятся в рассмотрение точки $(1')$, $(1'')$, $(2')$ и $(2'')$ (рис.), то параметры взаимодействия между звеньями определяются внешними факторами, соотносимыми с действиями в точках $(1')$, $(1'')$, $(2')$ и $(2'')$. Так, если сила P приложена только в точке $(1')$, то вместо суммарной жесткости k_1+k_2 (как в обычном параллельном соединении), мы получим значение приведенной жесткости $k_{пр}=k_1$, при нагрузке в точке $(1'')$ -соответственно следует $k_{пр}=k_2$ (рис.16).

При приложении силы P в промежуточной точке, например E (рис.19) на расстоянии r от центра тяжести весомого рычага, необходимо учесть, что силовая схема нагружения будет иметь свои особенности (рис.19).

При переносе силы P в центр масс рычага o_1 в системе появляется момент сил $M_{внеш}=P\cdot r$, по этому при рассмотрении движения в системе координат y, φ в качестве внешних сил возмущения в правой части системы дифференциальных уравнений (61) появятся соответствующие члены P и Pr.

Если используется система координат y_1 и y_2, то силы в точке $(1')$ и $(1'')$ будут иметь две компоненты

$$P_{1'}=P\frac{l_2}{l_1+l_2}+P\frac{r}{l_1+l_2}, \quad (64)$$

$$P_{1''}=P\frac{l_2}{l_1+l_2}-P\frac{r}{l_1+l_2}, \quad (65)$$

или после преобразований

$$P_{1'}=P\frac{l_2+r}{l_1+l_2}; \quad (66)$$

$$P_{1''}=P\frac{l_2-r}{l_1+l_2}. \quad (67)$$

Если $r=l_1$, то будем иметь

$$P_{1'}=P; \quad (68)$$

$$P_{1''}=0. \quad (69)$$

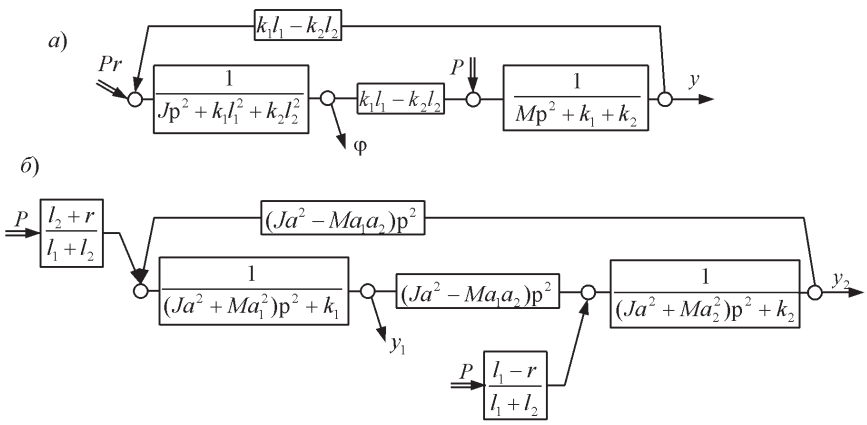


Рис.20. Структурные схемы с учетом корректировки: (а) – система координат y, φ; (б) – система координат y_1, y_2.

Однако, при выводе передаточных функций нужно будет внести соответствующие коррективы в структурные схемы, как это показано на рис.20*а*,*б*.

В связи со сделанной корректировкой получено, что

$$\overline{W}=\frac{\overline{y}_{1'}}{\overline{P}_{1'}}=\left(\frac{l_2+r}{l_1+l_2}\right)\left[\frac{(Ja^2+Ma_2^2)p^2+k_2}{\rho_4+\rho_2+k_2(Ja^2+Ma_1^2)+k_1k_2}\right]+$$
$$+\left(\frac{l_1-r}{l_1+l_2}\right)\left[\frac{(Ja^2+Ma_1^2)p^2+k_1}{\rho_4+\rho_2+k_2(Ja^2+Ma_1^2)+k_1k_2}\right] \quad (70)$$

или после преобразования -

$$W=\frac{y_{1'}}{P_{1'}}=\frac{(l_2+r)\left[(Ja^2+Ma_2^2)p^2+k_2\right]}{(l_1+l_2)\left[\rho_4+\rho_2+k_2(Ja^2+Ma_1^2)+k_1k_2\right]}+$$
$$+\frac{(l_1-r)\left[(Ja^2+Ma_1^2)p^2+k_1\right]}{(l_1+l_2)\left[\rho_4+\rho_2+k_2(Ja^2+Ma_1^2)+k_1k_2\right]}. \quad (71)$$

При $J=0$ и $M=0$ выражение (71) примет вид:

$$W=\frac{y_{1'}}{P_{1'}}=\frac{(l_2+r)k_2+(l_1-r)k_1}{(l_1+l_2)\left[k_1k_2\right]}. \quad (72)$$

а при $l_1=l_2=l$ соответственно -

$$W=\frac{y_{1'}}{P_{1'}}=\frac{(l+r)k_2+(l-r)k_1}{2l\left[k_1k_2\right]}. \quad (73)$$

В более компактной форме (73) имеет вид

$$W=\frac{y_{1'}}{P_{1'}}=\frac{2lk_1k_2}{(l-r)k_1+(l+r)k_2}. \quad (74)$$

Заключение. Подводя некоторые итоги проведенным исследованиям, можно сделать вывод, что, если рычаг обладает массой и моментом инерции, то в таком виде он представляет собой обычную расчетную схему механической колебательной системы в виде твердого тела на двух упругих опорах (балка на двух упругих опорах). В этом случае как-бы стирается грань между последовательным и параллельным соединением, если приложение силы, соотносится с ее действием на плечо рычага между точками разнесения ($1'$), ($1''$), ($2'$) и ($2''$) (точка Е на рис.19).

Однако, полученные результаты имеет практическое значения, поскольку развиваемый подход позволяет внести в рассмотрение детали взаимодействия, определяемые характером накладываемых связей, реализуемых через механические звенья, механические цепи. Последнее имеет значение для более полного учета конструктивных свойств и особенностей динамических колебательных систем, когда определяются для практических целей их динамические характеристики.

Отметим также, что при всей схожести схем нагружения имеются и вполне определенные различия. При последовательном соединении внешнее воздействие прикладывается к точке (1), а «разносится» с помощью рычага к точке 2 ($2'$ и $2''$), тогда как точка 3 может быть связана с неподвижной системой отсчета (неподвижной поверхностью) или входить в контакт с соответствующими элементами (звеньями) системы, в которую исходное образование входит как составная частью Поэтому последовательное соединение, по-существу, определяет связь между точками 1 и 3. В этом плане параллельное соединение рассматривается как связь между точками 1 и 2, которые

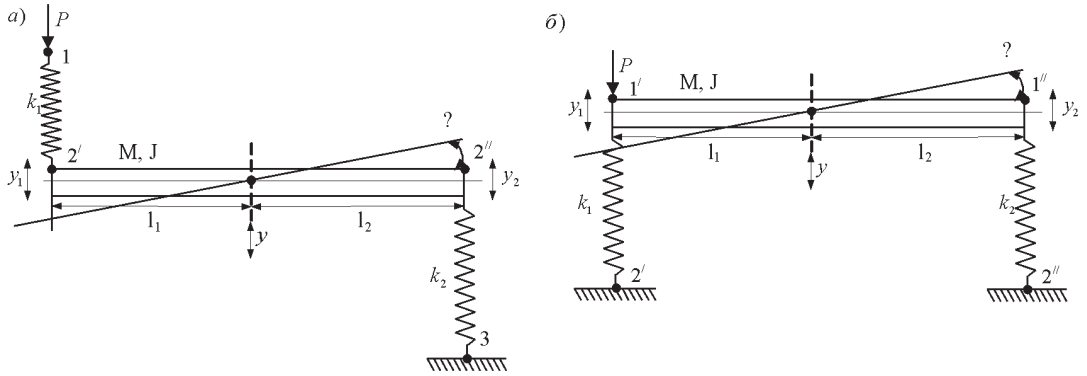


Рис.21. Схемы последовательного (а) и параллельного (б) соединения двух пружин k_1 и k_2 с использованием рычага.

могут разноситься с помощью рычагов на точки ($1'$), ($1''$), ($2'$) и ($2''$).

Если рассматривается рычаг, имеющий инерционные свойства как показано на рис.21*а*,*б*, то внешние воздействия прикладываются к различным точкам:

- при последовательном соединении к точке 1 (рис.21*а*);
- при параллельном соединении к точке $1'$ или $1''$ (рис.21*б*).

Не исключая возможность совпадения результатов в случаях а и б (рис.21), отметим, что разница между двумя типами соединений все же носит достаточно принципиальный характер. Имеется в виду то обстоятельство, что внешнее воздействие прикладывается к разным точкам механической системы. Случай, представленный на рис.21*а*,*б* носит частный характер, отражая размытость граней между чисто последовательным и чисто параллельным соединением. Возможны, как показывают исследования и комбинированные, более сложные варианты, приводимые при обнулении параметров рычага, к исходным известным правилам соединения элементов.

Выше приведенное затрудняет использование рычага в структурных интерпретациях в качестве еще одного дополнительного типового звена 1-го уровня [2], [4], но, определенно, вводит специальный способ или новый тип соединения двух звеньев между собой, учитывающий важное свойство в конкретных конструкторско-технических решениях, когда в упругих взаимодействиях участвует несколько одновременно работающих звеньев, линия действия усилий в которых не находится на одной линии.

Развивая этот подход, можно представить себе соединение определенного набора звеньев (это могут быть пружины, демпферы и т.д.), которые соединяются через сложный рычаг, как это показано на рис.22*а*,*б*.

Если на рис.22а представлена схема последовательно-параллельного соединения трех пружин k_1, k_2 и k_3, приведенная жесткость которого имеет вид

$$K_{пр} = \frac{(k_2 + k_3)k_1}{k_1 + k_2 + k_3}, \qquad (75)$$

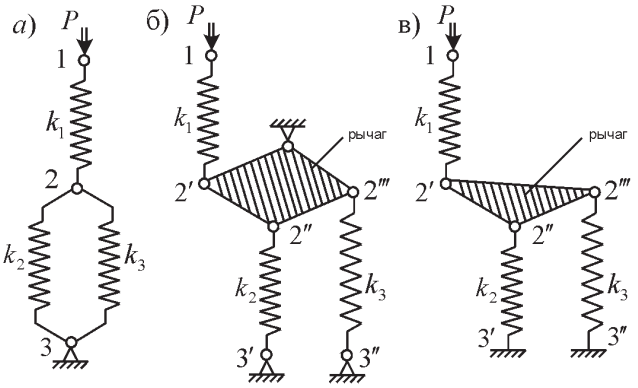


Рис.22. Схемы соединения с использованием планарного рычага с тремя точками.

то на рис.22*б* и *в* показаны возможные варианты соединения, которые могут быть получены при введении рычага с неподвижной точкой опоры или весомого рычага, у которого центр вращения не фиксируется.

Таким образом, появляется возможность реализации новых способов соединения типовых элементарных звеньев через рычаг, создать некоторые основы для поиска закономерностей построения сложных колебательных структур, которые могут найти различные приложения. Не исключено, что построение многих существующих сложных структур, в том числе молекулярных, можно помимо классических представлений об упругих взаимодействиях, описывать, используя специальные типы (или виды) соединений.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Дружинский И.А. Механические цепи. Издательства «Машиностроение». 1977. 238с.
2. Насников Д.Н., Логунов А.С. Типовые звенья в структурных интерпретациях механических колебательных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Вып.4 (12) ИрГУПС. Иркутск. 2006 С.70-78.
3. Гальперин И.Н. Автоматика как односторонняя механика. Издательство «Машиностроение». Москва. 1964. 248с.
4. Вибрации в технике: справочник. Том 4. Глава 2. Передаточные функции линейных механических систем. Москва. Издательство «Машиностроение». 1979. С.41-82.

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. УДК 621.311

МОДЕЛИ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

В последние годы наметился устойчивый интерес к совершенствованию моделей трансформаторов, которые позволили бы учесть структуру и особенности электромагнитного поля в них. Интерес этот обусловлен широкими возможностями компьютерного моделирования, а также в связи с наметившимся переходом к расчету режимов электрических систем (ЭС) в фазных координатах. Использование фазных координат обусловлено сложность. анализа несимметричных режимов работы трансформаторов на основе симметричных составляющих, что наглядно продемонстрировано в работе [1]. Некоторые авторы разрабатывают модели трансформаторов, не учитывающие особенностей конфигурации их магнитного поля. Так, например, в работе [2], предложена лучевая схема замещения тягового трансформатора. Другой подход [3] базируется на представлении трансформатора в виде многополюсника. Оба этих подхода позволяют моделировать частные виды трансформаторов без учета особенностей их магнитного поля. В статье [4] обращается внимание на значительное изменение распределения магнитного поля трансформатора при полной нагрузке по сравнению с холостым ходом и рассматривается влияние этого изменения на режим работы устройства. Более детальный подход к учету неравномерности распределения потоков и потерь в сердечниках с введением понятия магнитного тока смещения предложен в [5]. Этот подход позволяет учесть конфигурацию и нелинейные свойства магнитопровода, но сложен для алгоритмической реализации в программах расчетов режимов.

В работе [6] предложен метод моделирования трансформаторов, который дает возможность учесть распределение магнитных потоков в сердечниках и одновременно получить модели, эффективные для реализации в программах расчета несимметричных режимов ЭС и представляющие собой полносвязные RLC-схемы. Такой подход позволил использовать хорошо разработанные методы расчетов режимов и создать программный комплекс, обеспечивающий решение целого ряда актуальных задач, возникающих при проектировании и эксплуатации ЭС и систем электроснабжения железных дорог переменного тока [7]. Применение данного подхода к моделированию автотрансформаторов имеет ряд особенностей, которые рассматриваются ниже.

Моделирование трехфазного автотрансформатора на основе схемы, изображенной на рис. 1, в которой соединены концы первой обмотки и начала второй обмотки. Насыщение магнитопровода не учитывается. Потоки рассеяния учтены включением индуктивных элементов, а дополнительный магнитный поток, замыкающийся по маслу и стенкам бака, моделируется на основе двух крайних немагнитных стержней, имеющих относительную магнитную проницаемость, равную единице. Площади их сечения одинаковы и равны F_1. Три средних стержня характеризуются постоянной величиной комплексной магнитной проницаемости $\underline{\mu}'_{r2} - j\underline{\mu}''_{r2}$ и одинаковыми площадями сечения F_2. Каждая катушка обладает активным и реактивным сопротивлениями $R_i + jX_i$ в предположении их одинаковости для разных фаз. Числа витков w_i определяются по значению рабочей индукции B_m в сердечнике и номинальному напряжению катушки. Конструкции трансформатора симметрична, то есть выполняются равенства $\ell_1 = \ell_5$, $\ell_6 = \ell_7$, $\ell_8 = \ell_9$, $\ell_2 = \ell_4$ и $\Phi_6 = \Phi_8$, $\Phi_7 = \Phi_9$. Нумерация зажимов катушек начинается началами катушек высшего напряжения (фазы А, В, С),

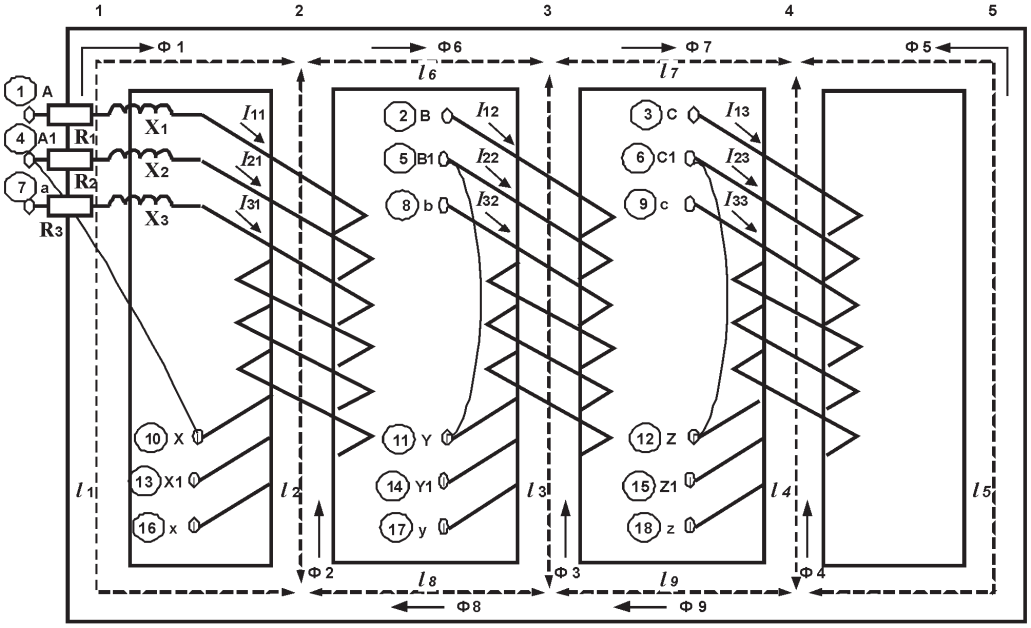


Рис. 1. Трехфазный автотрансформатор.

затем среднего и низшего напряжений, и далее нумерация продолжается для концов катушек в той же последовательности, как на рис. 1.

При симметричности сердечника относительно его средней линии и исключении магнитных потоков ярма уравнения электрического и магнитного состояний трехобмоточного автотрансформатора могут быть записаны так:

$$\left.\begin{aligned} &\underline{Z}\dot{I} + j\omega W_1 \dot{\Phi} = \dot{U}; \\ &W_2 \dot{I} = \underline{R}_m \dot{\Phi}, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} R_1 + jX_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & R_2 + jX_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_2 + jX_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & R_3 + jX_3 \end{bmatrix}$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0 & w_1 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & 0 \\ 0 & w_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_1 & 0 \\ 0 & 0 & w_2 & 0 \\ 0 & 0 & w_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_1 \\ 0 & 0 & 0 & w_2 \\ 0 & 0 & 0 & w_3 \end{bmatrix};$$

$$\dot{\Phi} = \left[\dot{\Phi}_1 \dot{\Phi}_2 \dot{\Phi}_3 \dot{\Phi}_4\right]^T;$$

$$\dot{U} = \left[\dot{U}_{11}\dot{U}_{21}\dot{U}_{31}\dot{U}_{12}\dot{U}_{22}\dot{U}_{32}\dot{U}_{13}\dot{U}_{23}\dot{U}_{33}\right]^T;$$

$$\dot{I} = \left[\dot{I}_{11}\dot{I}_{21}\dot{I}_{31}\dot{I}_{12}\dot{I}_{22}\dot{I}_{32}\dot{I}_{13}\dot{I}_{23}\dot{I}_{33}\right]^T;$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} -w_1 & -w_2 & -w_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ w_1 & w_2 & w_3 & -w_1 & -w_2 & -w_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_1 & w_2 & w_3 & -w_1 & -w_2 & -w_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_1 & w_2 & w_3 \end{bmatrix};$$

$$R_m = \begin{bmatrix} R_{m1} & -\underline{R}_{m2} & 0 & 0 \\ 2\underline{R}_{m6} & \underline{R}_{m2} + 2\underline{R}_{m6} & -\underline{R}_{m3} & 0 \\ 2\underline{R}_{m7} & 2\underline{R}_{m7} & \underline{R}_{m3} + 2\underline{R}_{m7} & -\underline{R}_{m4} \\ \underline{R}_{m5} & \underline{R}_{m5} & \underline{R}_{m5} & \underline{R}_{m4} + \underline{R}_{m5} \end{bmatrix}.$$

В систему (1) входят 9 уравнений электрического состояния и четыре уравнения магнитного состояния. Неизвестными являются 9 токов и 4 магнитных потока. Напряженности поля $\dot{H}_k$ связаны с магнитными сопротивлениями $\underline{R}_{mk}$ следующими соотношениями:

$$\dot{H}_k \ell_k = \frac{\dot{B}_k \ell_k}{\mu_0 \underline{\mu}_{rk}} = \underline{R}_{mk} \dot{\Phi}_k;$$

$$\underline{R}_{mk} = \frac{\ell_k}{\mu_0 F_1}, \text{ если } k = \overline{1,5};$$

$$\underline{R}_{mk} = \frac{\ell_k}{\mu_0\left(\underline{\mu}'_{r2} - j\underline{\mu}''_{r2}\right)F_2}, \quad \text{если } k = 2,3,4,6,7.$$

Из второго уравнения системы (1) может быть найден вектор магнитных потоков $\Phi = \underline{R}_m^{-1} W_2 \dot{I}$ и подставлен в первое уравнение:

$$\underline{Z}\dot{I} + j\omega W_1 \underline{R}_m^{-1} W_2 \dot{I} = \dot{U}.$$

В сокращенном виде последнюю систему можно записать так:

$$\underline{Z}_E \dot{I} = \dot{U}, \qquad (2)$$

где $\underline{Z}_E = \underline{Z} + j\omega W_1 \underline{R}_m^{-1} W_2$, ω= 314 рад/с.

Матрица проводимостей решетчатой схемы автотрансформатора первоначально определяется для разобщенных катушек трансформатора, и в этом случае она может быть получена на основе следующего матричного преобразования

$$\underline{Y} = M_0 \underline{Z}_E^{-1} M_0^T = \begin{bmatrix} \underline{D} & -\underline{D} \\ -\underline{D} & \underline{D} \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где $\underline{Y}$ — матрица проводимостей решетчатой схемы размерностью 2mx2m; $\underline{D} = \underline{Z}_E^{-1}$; m — исходное число узлов трансформатора без учета соединений обмоток; M_0 — топологическая матрица, определяемая на основе соотношения

$$M_0 = \begin{bmatrix} E_m \\ -E_m \end{bmatrix},$$

где E_m — единичная матрица размерностью mxm. Матрица $\underline{Y}$ не является традиционной матрицей проводимости или Y-матрицей многополюсника. Она отображает соединения полносвязной решетчатой схемы замещения устройства и ее элементы равны проводимостям ветвей, включенных между соответствующими узлами.

На основе схемы соединений катушек конкретного автотрансформатора выполняется преобразование матрицы $\underline{Y}$ путем объединения соответствующих узлов и сложения образующихся при этом параллельных ветвей решетчатой схемы. Указанное преобразование можно проиллюстрировать следующим образом. Предположив, без потери общности, что объединяемые k узлов имеют последние номера, можно разделить матрицу $\underline{Y}$ на блоки:

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 & \underline{Y}_{12} \\ Y_{12}^T & \underline{Y}_2 \end{bmatrix}.$$

где $\underline{Y}_2$ - блок размерностью k x k, отвечающий объединяемым узлам.

Тогда преобразованную матрицу $\underline{Y}_S$ можно представить в виде

$$\underline{Y}_S = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 & \underline{Y}_{12} e_k \\ e_k^T Y_{12}^T & e_k^T \underline{Y}_2 e_k \end{bmatrix},$$

где $e_k = [1\ 1 \ldots 1]^T$ — k-мерный вектор, состоящий из единиц.

После прибавления к диагональным элементам матрицы $\underline{Y}_S$ поперечных проводимостей на землю y_{i0} можно окончательно записать

$$\underline{Y}_\Delta^{i0} = \underline{Y}_S + \mathrm{diag}\,\underline{y}_{i0}.$$

Определение параметров автотрансформатора, используемых в системе (2), по его паспортным данным имеет некоторые особенности по сравнению с параметрами обычного трансформатора, методика определения которых изложена в работе [6].

Параметры матрицы $\underline{Z}$ определяются через напряжения u_{k12}, u_{k13}, u_{k23} и потери ΔP_{k12}, ΔP_{k13}, ΔP_{k23} короткого замыкания, номинальные значения проходной мощности $S_н$, мощности третьей обмотки $S_{н3}$ и первичного фазного напряжения $U_н$ с некоторыми отличиями от методики расчета параметров трансформатора [6], сводящимися к суммированию витков первичной и вторичной обмоток:

$$R_1 = R_{12} - R_2'; \; R_2 = R_2'\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2; \; R_3 = R_3'\left(\frac{w_3}{w_1 + w_2}\right)^2;$$

$$X_1 = X_{12} - X_2'; X_2 = X_2'\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2;$$

$$X_3 = X_3'\left(\frac{w_3}{w_1 + w_2}\right)^2,$$

где $R_2' = \dfrac{R_{12} - R_{13} + R_{23}}{2\left(1 + \dfrac{w_2}{w_1}\right)}$; $R_3' = R_{23} - R_2'\left(1 + \dfrac{w_2}{w_1}\right)^2$;

$$R_{12} = \frac{3\Delta P_{12} U_н^2}{S_н^2}; \; R_{13} = \frac{3\Delta P_{13} U_н^2}{S_н^2}; \; R_{23} = \frac{3\Delta P_{23} U_н^2}{S_{н3}^2};$$

$$X_{12} = \frac{3u'_{k12} U_н^2}{S_н}; \; X_{13} = \frac{3u'_{13} U_н^2}{S_н}; \; X_{23} = \frac{3u'_{k23} U_н^2}{S_{н3}};$$

$$u'_{k12} = \sqrt{u_{k12}^2 - \left(\frac{P_{12}}{S_н}\right)^2}; \quad u'_{k13} = \sqrt{u_{k13}^2 - \left(\frac{P_{13}}{S_{н3}}\right)^2};$$

$$u'_{k23} = \sqrt{u_{23}^2 - \left(\frac{P_{23}}{S_3}\right)^2}; \quad X'_2 = \frac{X_{12} - X_{13} + X_{23}}{2\left(1 + \frac{w_2}{w_1}\right)};$$

$$X'_3 = X_{23} - X'_2\left(1 + \frac{w_2}{w_1}\right)^2.$$

Магнитные сопротивления модели определяются так же, как и для обычного трансформатора [6], с заменой числа витков w_1 на сумму $w_1 + w_2$:

$$R''_{m2} = \frac{p_x}{6 + 4k_{72}}; \; R'_{m2} = \frac{q_x}{6 + 4k_{72}}; \; k_{72} = \frac{2\ell_7}{\ell_2},$$

где

$$p_x = \frac{2\omega(w_1 + w_2)^2 \Delta P_x}{U_н^2}; \; q_x = \frac{2\omega(w_1 + w_2)^2 \Delta Q_x}{100U_н^2};$$

$$\Delta Q_x = \sqrt{(i_x S_н)^2 - P_x^2},$$

где ΔP_x — потери холостого хода, i_x — ток холостого хода в относительных единицах.

Описанная методика, реализованная в комплексе программ визуального моделирования несимметричных режимов FLOW3[1] [7], позволяет получать модели автотрансформаторов различного конструктивного исполнения для применения их при расчетах установившихся режимов и токов короткого замыкания ЭС и систем электроснабжения железных дорог.

Вывод.

Полученные соотношения, позволяющие моделировать автотрансформаторы различного конструктивного исполнения на основе фазных координат с учетом специфики соединения их обмоток и распределения магнитных потоков в сердечниках, показали хорошую адекватность моделей при их применении для расчетов режимов электрических систем и систем электроснабжения железных дорог.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов [Текст] / В.А. Мартынов. — Электричество. — 2003. — № 9. — С. 54-61.
2. Герман Л.А. Схема замещения электрифицированного участка железной дороги [Текст] / Л.А. Герман. — Электричество. — 1988. — № 3. — С. 34-39.
3. Бутырин П.А. Упрощенные математические модели трехфазных трансформаторов для целей диагностики [Текст] / П.А. Бутырин, Т.А. Васьковская, М.Е. Алпатов // Электро. — 2002. — № 1. — С. 17-20.
4. Александров Г.Н. Особенности магнитного поля трансформатора под нагрузкой [Текст] / Г.Н. Александров — Электричество. — 2003. — № 5. — С. 19-26.
5. Шакиров, М.А. Магнитоэлектрические схемы замещения катушек индуктивности и трансформаторов [Текст] / М.А. Шакиров — Электричество. — 2003. — № 11. — С. 34-45.
6. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. — Иркутск: Иркут. ун-т. — 2005. — 273 с.
7. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2005611176 (РФ) «Flow3 — расчеты режимов электрических систем в фазных координатах» / Крюков А.В., Закарюкин В.П. — Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. — Зарегистр. 19.05.2005.

[1] Полнофункциональная версия комплекса FLOW3 с ограничением максимально допустимого числа узлов доступна на сайте кафедры электроснабжения ИрГУПС по адресу www.iriit.irk.ru/web-edu/~egt/ .

Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. УДК 621.311

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ НА ПОДЗЕМНЫЙ ТРУБОПРОВОД

При проектировании и эксплуатации силовых кабельных линий иногда возникают ситуации, когда со стороны организаций, имеющих подземные коммуникации разного рода, возникают претензии по ухудшению электрокоррозионной обстановки из-за влияния силового кабеля. Хотя на переменном токе электрокоррозия практически отсутствует, нормативные документы по защите от электрокоррозии предусматривают возможности возникновения эффектов выпрямления переменного тока, приводящие к возникновению постоянных электрических потенциалов, и эта не совсем очевидная ситуация требует отдельного рассмотрения. В данной статье анализируется электромагнитное влияние силового электрического кабеля 10 кВ на подземный трубопровод.

Нормативные документы [1, 2] устанавливают требования по защите от коррозии наружной поверхности подземных металлических сооружений, в том числе трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей. Эти требования необходимо учитывать и при проектировании объектов, являющихся источниками блуждающих токов, как постоянных, так и переменных. В соответствии с ГОСТ 9.602-2005 опасное влияние переменного тока промышленной частоты на стальные подземные сооружения характеризуется либо смещением среднего потенциала сооружения в отрицательную сторону не менее чем на 10 мВ по отношению к стационарному потенциалу, либо наличием переменного тока плотностью более 10 А/м^2 на вспомогательном электроде. Первая характеристика касается возможного выпрямления переменного тока с появлением дополнительных постоянных потенциалов на стальном сооружении. Вторая величина, которая может быть найдена расчетным путем, определяет максимально допустимую плотность переменного тока, стекающего с подземного сооружения. ГОСТ 9.602-2005 требует обеспечивать защиту от коррозии, вызываемой переменными токами с плотностью больше указанной величины. При этом используется метод катодной поляризации.

Высоковольтные сильноточные электрические линии переменного тока оказывают опасные электромагнитные влияния на смежные низковольтные линии и сооружения, включая подземные коммуникации. По физическому механизму различают три следующих вида влияния [3].

Во-первых, электрическое влияние, появляющееся за счет емкостной связи между влияющей линией и смежной линией. Этот вид влияния легко экранируется, а для подземных сооружений не имеет места ввиду достаточно большой проводимости грунтов.

Во-вторых, магнитное влияние, обусловленное наведением электродвижущей силы в контуре смежная линия (или коммуникация, в том числе и подземная) — земля. Ток, протекающий во влияющей линии, создает магнитное поле в окружающем пространстве, в том числе и в земле. Магнитное поле частотой 50 Гц проникает вглубь земли примерно на 1 км, поэтому в части магнитного влияния подземные коммуникации мало отличаются от надземных. Переменное магнитное поле создает электродвижущую силу в смежной линии, распределенную вдоль этой линии (рис. 1).

Влияющую и смежную линии можно рассматривать как трансформатор без сердечника, первичная обмотка которого образована влияющим проводом и землей, а вторичная обмотка — это контур смежная линия — земля.

В-третьих, гальваническое влияние, возникающее за счет токов, протекающих в земле, на объектах, имеющих заземления.

Источниками влияния переменного тока являются подземные силовые электрические кабели, которые могут стать причиной появления на подземных трубопроводах опасных с точки зрения коррозии потенциалов или боль-

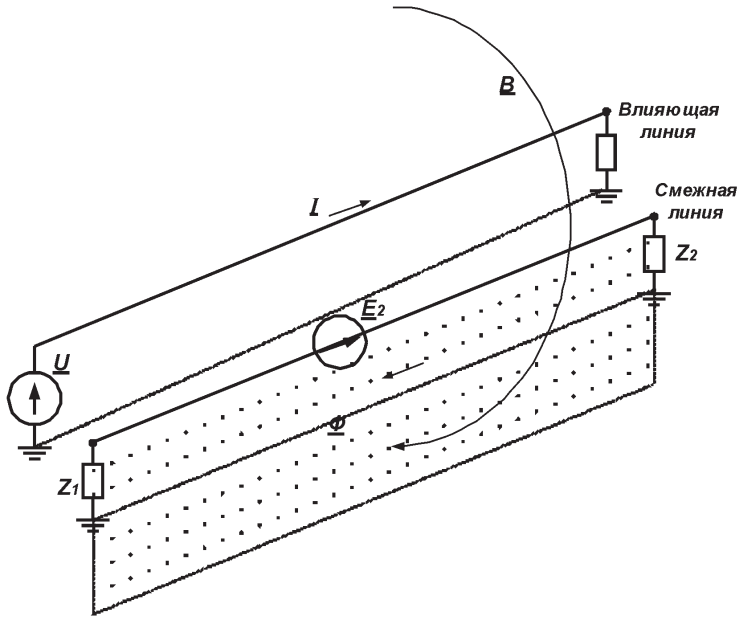


Рис. 1. К оценке влияния линии электропередачи на смежные линии.

ших плотностей переменного тока, превышающих нормированные значения. В данной статье проведены расчеты верхних пределов возможных плотностей переменного тока, стекающих с трубопровода за счет влияния подземного силового кабеля.

Одним из источников влияний переменного тока являются высоковольтные линии электропередачи, способные индуцировать переменные токи на стальных подземных трубопроводах. Кабельные линии электропередачи с изолированной нейтралью оказывают существенно меньшее влияние по сравнению с воздушными линиями из-за очень близкого расположения друг к другу жил кабеля и равенства суммы токов в жилах нулю в нормальных нагрузочных режимах, в том числе и несимметричных.

Ток в оболочке кабеля в сетях с изолированной нейтралью протекает только в аварийных режимах. При коротких замыканиях время протекания этого тока составляет доли секунды; такие кратковременные токи не вызывают электрокоррозии. Однофазные замыкания на землю могут быть длительными, однако токи однофазного замыкания в сетях 10 кВ не могут превышать 20 А [4]. Такие токи, стекающие с оболочки кабеля в землю, не приведут к заметным плотностям токов, втекающим в трубопровод. Действительно, если предположить самые худшие условия втекания в трубопровод диаметром 100 мм всего тока 20 А на весьма малой эффективной длине 10 м, то плотность тока не превысит величину 7 А/м^2, что меньше допустимых 10 А/м^2. В реальных условиях через трубопровод будет протекать небольшая доля тока оболочки кабеля при более значительных эффективных длинах трубопровода, так что гальваническое влияние кабельной линии не приведет к появлению заметной плотности тока.

Таким образом, единственным видом влияния кабельной линии на трубопроводы является магнитное влияние, для которого расчетным путем определяется максимально возможная плотность тока на трубопроводе.

Задача решается со следующими исходными данными:

- кабели марок ААБл 3х185 и ААБл 3х240, нагрузка кабеля соответствует максимально допустимому длительному току кабеля (290 и 330 А соответственно для двух марок кабеля);
- глубина прокладки кабеля в земле 0.7 м;
- длина кабельной линии — от 100 м до 5 км;
- грунт — суглинок с удельной проводимостью 100 Ом·м;
- минимальное расстояние между кабелем и трубопроводом 1 м;
- пересечение кабельной линии и трубопровода под углом 60°;
- отсутствие изоляционного покрытия трубопровода.

Расчеты наводимых напряжений и плотностей переменного тока проведены с использованием программного комплекса Flow3 расчетов электрических систем в фазных координатах [5]. Программный комплекс обеспечивает совместное моделирование любых однофазных и трехфазных электрических систем переменного тока с решением следующих задач:

- моделирование решетчатыми схемами замещения воздушных и кабельных линий, однофазных и трехфазных трансформаторов;

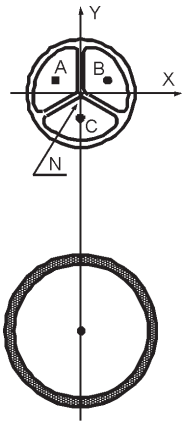


Рис. 2. Схема параллельного расположения кабеля и трубопровода.

- графическое построение расчетной схемы на экране монитора;
- расчет симметричных и несимметричных установившихся режимов электрических систем с определением наводимых напряжений и токов электрического и магнитного влияний.

Расчет при параллельном расположении кабеля и трубы даст максимально возможные наводимые токи магнитного влияния из-за наибольшей длины зоны влияния. При расположении кабеля перпендикулярно трубе наводимые напряжения и токи магнитного влияния будут отсутствовать.

Наведенное напряжение увеличивается с ростом сечения. Причина этого эффекта заключается в возрастании поперечной несимметрии жил и величины допустимого тока. Увеличение удельной проводимости земли приводит к пропорциональному возрастанию переходного сопротивления труба-земля с соответствующим снижением тока, а увеличение диаметра трубы, мало снижая переходное сопротивление, приводит к росту площади контакта со снижением плотности тока. Параллельное расположение кабеля ААБл 3х240 и трубопровода с диаметром трубы 100 мм при удельной проводимости грунта 100 Ом·м дает наибольшие наводимые плотности тока с поверхности трубы, поэтому этот вариант принят в качестве расчетного для оценки верхнего значения плотности тока.

Расчеты плотности стекающего с трубопровода переменного тока выполнялись в следующей последовательности:

1. Для параллельного расположения кабеля и трубопровода (рис. 2) определяются положения центров тока жил кабеля (табл. 1).

2. Для трубопровода рассчитывается продольное электрическое сопротивление металла трубы на единицу ее длины Rпрод через удельное сопротивление металла трубы ρм (для трубной стали 0,25 Ом·мм^2/м), ее диаметр D (м) и толщину стенки δ (мм) по формуле [2]:

$$R_{прод} = \frac{\rho_м}{\pi(10^3 D - \delta)\delta}, \text{ Ом/м.}$$

По заданным удельному сопротивлению грунта ρ, Ом·м, расстоянию h от поверхности земли до оси трубы, м, определяется переходное сопротивление труба-земля Rпер. При отсутствии изоляционного покрытия трубопровода переходное сопротивление вычисляется через сопротивление горизонтального заземлителя [2]:

$$R_Г = \frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{D} + \ln\frac{l + \sqrt{l^2 + 16h^2}}{4h}\right], \text{ Ом,}$$

где l — длина трубы, м.

При h<< l получается

$$R_Г = \frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{l^2}{Dh}, \text{ Ом,}$$

и далее

$$R_{пер} = R_Г \cdot l, \text{ Ом·м.}$$

Табл. 1

Положение электрических центров жил кабеля ААБл 3х240.

Сечение мм^2	Высота сектора, мм	Ширина сектора, мм	Периметр, мм	Сумм. толщина изоляции, мм	Радиус жилы, мм	XA, мм	YA, мм	XB, мм	YB, мм	XC, мм	YC, мм
185	21,2	12,6	-	2,7	15,3	-6,6	3,8	6,6	3,8	0	-7,7
240	27,2	16,7	66	3,4	20,1	-8,7	5,0	8,7	5,0	0	-10,1

Табл. 2

Продольные и поперечные сопротивления и проводимости трубопровода

D (м)	δ, мм	Rпрод, Ом/м	Rпрод, Ом/км	h, м	l, м	RГ, Ом	Rпер, Ом·м	Gпер, См/км	Rвх, Ом	Gвх, См
0,1	5	0,000168	0,168	1,7	1000	0,248	248	4,03	0,102	9,8
0,5	5	0,000032	0,032	1,7	1000	0,222	222	4,50	0,042	23,6
0,1	5	0,000168	0,168	1,7	5000	0,060	299	3,34	0,112	8,9
0,5	5	0,000032	0,032	1,7	5000	0,055	274	3,65	0,047	21,3

Для учета части трубопровода, находящегося вне зоны влияния, необходимо определить входное сопротивления этой части, которое вычисляется по формуле [2]:

$$R_{вх} = 0.5\sqrt{R_{прод} R_{пер}}, \text{ Ом.}$$

Величины $R_{прод}$, $R_{пер}$, $R_{вх}$ используются при составлении расчетной схемы программного комплекса Flow3. В табл. 2 представлены значения этих параметров, а также величины проводимости утечки труба-земля $G_{пер}$ на 1 км трубы и входной проводимости $G_{вх}$ части труб, находящейся вне зоны влияния. Последний параметр был использован для установки шунта на расчетной схеме комплекса Flow3 для учета этой части трубы.

Из табл. 2 видно, что длина и диаметр трубы мало влияют на величину $R_{пер}$.

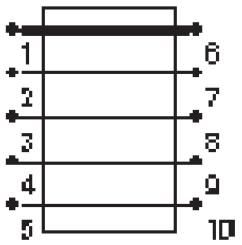


Рис. 3. Элемент пятипроводной системы токоведущих частей.

Переходная проводимость оболочки кабеля по отношению к земле при контакте оболочки с землей для кабеля с внешним диаметром 50 мм равна $G_{пер} = 3.6$ См·км.

3. В соответствии с параметрами табл. 1 и 2 в редакторе комплекса Flow3 выполнен элемент пятипроводной системы токоведущих частей (три жилы и оболочка кабеля, труба), изображенный на рис. 3, на котором верхняя линия соответствует трубопроводу, вторая — оболочке кабеля, три нижних — жилам кабеля. Этот элемент использован для составления расчетной схемы (рис. 4), на которой для учета распределенности системы установлено 10 последовательно соединенных элементов. Подключенные резистивные элементы соответствуют переходной проводимости труба-земля соответствующей длины, на узлах их свободных концов установлены шунты большой проводимости. Шунты в концевых узлах трубопровода 26 и 81 соответствуют $G_{вх}$ табл. 2.

4. По схеме, изображенной на рис. 4, выполнены расчеты режимов при разных длинах зоны влияния. Полученные величины токов по резистивным элементам I пересчитаны в плотности тока j в соответствии с выражением

$$j = \frac{I}{\pi D \Delta l},$$

где Δl — длина многопроводного элемента. Для крайних элементов берется половина этой длины, поскольку крайние резистивные элементы моделируют половину утечки на землю.

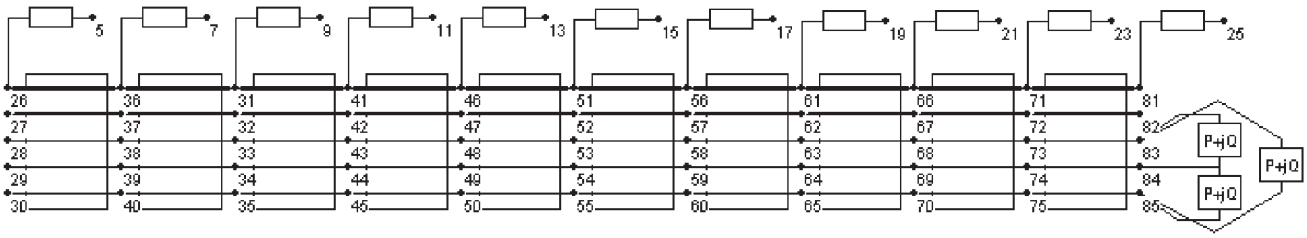


Рис. 4. Расчетная схема.

Табл. 3

Токи и плотности тока, стекающего с трубы, при номинальной нагрузке.

Длина, м	Показатель \ узел	26	36	31	41	46	51	56	61	66	71	81
5000	Координата, м	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
	Ток, А	0,02	0,07	0,06	0,04	0,02	0	0,02	0,04	0,06	0,07	0,02
	Плотность тока, А/м2	0,00025	0,00045	0,00038	0,00025	0,00013	0,00000	0,00013	0,00025	0,00038	0,00045	0,00025
1000	Координата, м	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
	Ток, А	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01
	Плотность тока, А/м2	0,00064	0,00032	0,00032	0,00032	0,00000	0,00000	0,00000	0,00032	0,00032	0,00032	0,00064

Результаты расчетов режимов сведены в табл. 3, где представлены плотности тока, стекающего с трубопровода в землю, при двух длинах сближения (5000 и 1000 м) и максимально допустимом токе кабеля 330 А.

Рис. 5 иллюстрирует зависимость плотности стекающего тока от координаты вдоль трубы. Эта зависимость имеет максимумы плотности тока на краях зоны влияния.

Полученные значения плотности стекающего тока, наведенного со стороны кабельной линии за счет поперечной несимметрии жил кабеля по отношению к трубопроводу, на четыре порядка меньше опасного уровня в 10 А/м^2. При уменьшении длины сближения уменьшаются и наведенные токи из-за преобладающего влияния сопротивления самозаземления трубопровода по сравнению с его продольным сопротивлением; уменьшение длины снижает наведенную ЭДС, но не снижает входные сопротивления участков трубы вне зоны влияния.

Протекание по оболочке кабеля нескомпенсированного тока 20 А, возможного в некоторых режимах однофазного замыкания на

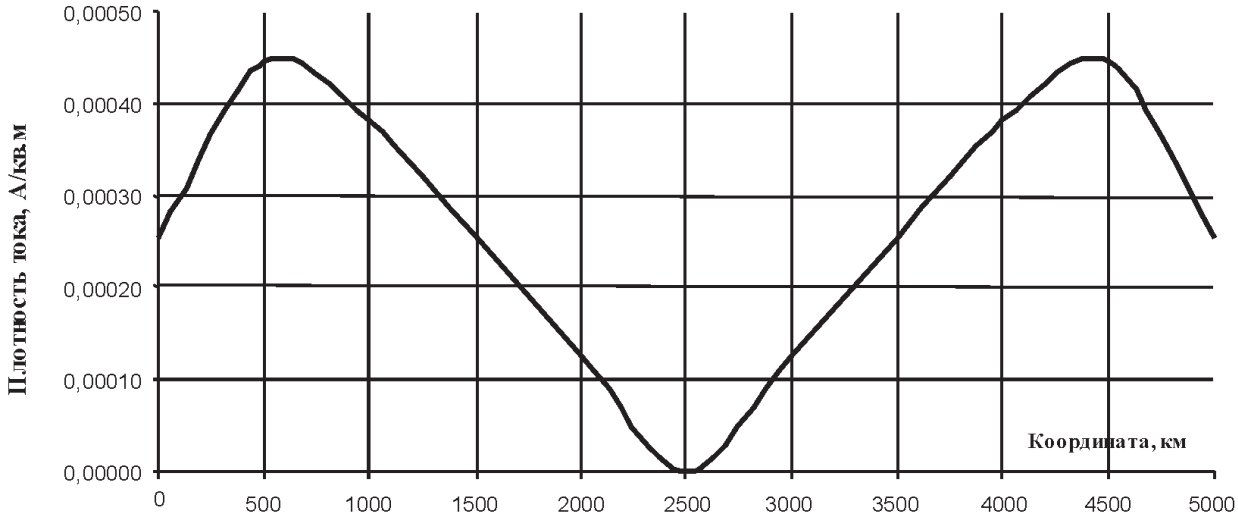


Рис. 5. Зависимость плотности стекающего тока от координаты вдоль трубы.

Табл. 4

Токи и плотности тока, стекающего с трубы, при токе 20 А в оболочке.

Длина м	Показатель \ узел	26	36	31	41	46	51	56	61	66	71	81
5000	Координата, м	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
	Ток, А	1,09	1,1	0,56	0,28	0,12	0	0,12	0,28	0,56	1,1	1,09
	Плотность тока, А/м^2	0,01388	0,00700	0,00357	0,00178	0,00076	0,00000	0,00076	0,00178	0,00357	0,00700	0,01388

землю, приводит к появлению наведенных токов, представленных в табл. 4.

Хотя значения наведенных токов существенно выше, чем в нормальных режимах, но плотности тока, тем не менее, остаются на три порядка меньше допустимых значений.

Выводы.

1. Из трех видов электромагнитного влияния кабельной линии на трубопровод — электрического, магнитного и гальванического — значение может иметь только магнитное влияние. Электрическое влияние отсутствует ввиду расположения кабеля и трубопровода в проводящем грунте, а гальваническое влияние мало ввиду изолированной нейтрали, при которой нескомпенсированные токи по оболочке кабеля могут протекать только в режиме однофазного замыкания. Эти токи не превышают 20 А и не представляют опасности для трубопровода.

2. Расчетные значения плотности стекающего тока, наведенного со стороны кабельной линии за счет магнитного влияния, пренебрежимо малы. Таким образом, даже в случае наихудшего сочетания параметров пересечения кабельной линии напряжением 10 кВ с трубопроводом коррозионное влияние кабеля на трубопровод отсутствует.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. ГОСТ 9.602-2005. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 22 июня 2005. - 26 с.
2. РД 153-39.4-091-01. Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. Принята и введена в действие приказом Минэнерго России 29 декабря 2001. - 54 с.
3. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. — М.: Транспорт, 1989. — 134 с.
4. Правила устройства электроустановок. Издание 7. — М.: Изд-во ЗАО "Энергосервис", 2002. - 72 с.
5. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст]: монография / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. — Иркутск: Иркут. ун-т. — 2005. — 273 с.

Краковский Ю.М., Воложанина О.А.

УДК 331.108.4:519

АНАЛИЗ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ ГРУПП СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ НА РЫНКЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ ЧИТИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение

Основная проблема существующей системы образования проявляется в несоответствии уровня выпускаемых вузами специалистов потребностям общества, динамике его развития. Частично это связано с тем, что рынок труда оперативнее реагирует на изменения в экономике. В этой связи у вузов при планировании своей деятельности возникает потребность в исследовании рынка образовательных услуг во взаимодействии с рынком труда, а, следовательно, и использовании инструментов стратегического анализа.

Стратегический анализ рынка — это, с одной стороны, изучение закономерностей его развития с учетом влияния средств маркетинга и конкурентной борьбы в целях прогнозирования долгосрочных перспектив рыночной ситуации. С другой стороны — это этап стратегического планирования, позволяющий сформировать набор стратегических альтернатив. В таких исследованиях широко применяются методы портфельного анализа [1].

Под стратегическим позиционированием понимается основной прием портфельного анализа, заключающийся в построении двумерных матриц, с помощью которых бизнес-единицы или отдельные продукты сравниваются между собой по различным критериям. Стратегическое позиционирование является одним из этапов портфельного анализа и представляет собой инструмент обработки статистики для последующего анализа и разработки стратегии развития объекта.

Для исследования развития рынка образовательных услуг и его взаимодействия с рынком труда использован модифицированный метод Бостонской консалтинговой группы (БКГ), адаптированный для анализа стратегического положения образовательного модуля (вузы, специальности и т.д.) на исследуемом региональном рынке [2, 3]. Этот метод классифицирует образовательные модули (ОМ) на четыре группы («собаки», «звезды», «знаки вопроса» и «дойные коровы») по двум показателям (координатам). По оси абсцисс откладывается удельный вес каждого ОМ в объеме выпуска (приема, контингента) (U), а по оси ординат — соотношение темпов роста каждого образовательного модуля и совокупного выпуска (приема, контингента) (T).

В работе [2] предложено ввести еще дополнительную область, названную «зона неопределенности». Появление этой зоны связано с тем, что границы групп определяются двумя методами: как средние значения и как значения медианы.

Удельный вес каждого ОМ в темпе изменения суммарного объема (T_i) рассчитывается по формуле

$$T_i = \frac{a_i - a_{\min}}{a_c - a_{\min}} 100\%, i = \overline{1, I}, \qquad (1)$$

где a_c — среднее значение коэффициента a (коэффициенты a_i определяются методом наименьших квадратов);

$a_{\min} = \min_i a_i$; $a_{\max} = \max_i a_i$;

I — число образовательных модулей.

Доля каждого ОМ в совокупном суммарном объеме (U_i) определяется по одному из двух вариантов:

1) на конкретный год j_0

$$U_i = \frac{Y_{ij_0}}{\sum_{i=1}^{I} Y_{ij_0}} 100\%; \qquad (2)$$

2) по определенному периоду времени J_0

$$U_i = \frac{\sum_{j \in J_0} Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{I} \sum_{j \in J_0} Y_{ij}} 100\%. \qquad (3)$$

Поэтапный анализ информации за несколько интервалов, позволяет сделать выводы о развитии рынка и стадии жизненного цикла объектов (начало, рост, зрелость, спад).

Подобный подход при обработке собранной по ОМ информации позволяет говорить о моделировании рынка ОУ, когда производится прогноз его развития, но не в смысле прогнозирования основных показателей, а в смысле возможных положений ОМ в системе координат *(U, T)*.

Исходные данные.

Данное исследование проведено по приему (табл. 1) и выпуску студентов (табл. 2) вузов Читинской области в разрезе групп специальностей. В Читинской области ведется подготовка по направлениям и специальностям высшего профессионального образования, сгруппированным по 17 группам. Нами оставлено меньшее число групп — 9, наиболее крупных по контингенту.

Табл. 1

Прием студентов в вузы в разрезе групп специальностей.

Прием	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2002	3491	2192	1033	515	501	306	250	359	204
2003	4197	2355	1348	759	559	342	305	263	211
2004	3879	2285	1359	615	579	362	292	283	278
2005	3002	2047	1023	646	597	301	347	260	227
2006	3228	1581	590	560	556	454	318	258	215

Табл. 2

Выпуск специалистов из вузов в разрезе групп специальностей.

Выпуск	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2002	2136	1133	831	167	358	50	109	73	113
2003	2221	1373	1097	217	310	90	134	125	118
2004	2050	1379	1198	229	327	93	130	78	151
2005	2957	1734	1379	220	353	109	123	151	180
2006	2756	1584	1058	259	391	116	134	128	153

Примечание:
1. Экономика и управление;
2. Гуманитарные и социальные науки;
3. Образование и педагогика;
4. Транспортные средства;
5. Здравоохранение;
6. Сельское и рыбное хозяйство;
7. Архитектура и строительство;
8. Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника;
9. Геология, разведка и разработка полезных ископаемых.

Результаты исследования.

Для каждой таблицы исходных данных получено по две матрицы БКГ: а) координата *U* считается за период времени с 2002 по 2006 год, формула (3); б) координата *U* считается на 2006 год, формула (2). На рис. 1 приведены результаты по приему для случая а); на рис. 2 приведены результаты по выпуску для случая б).

При анализе выпуска (рис. 2), в секторе «звезды» находятся три группы специальнос-

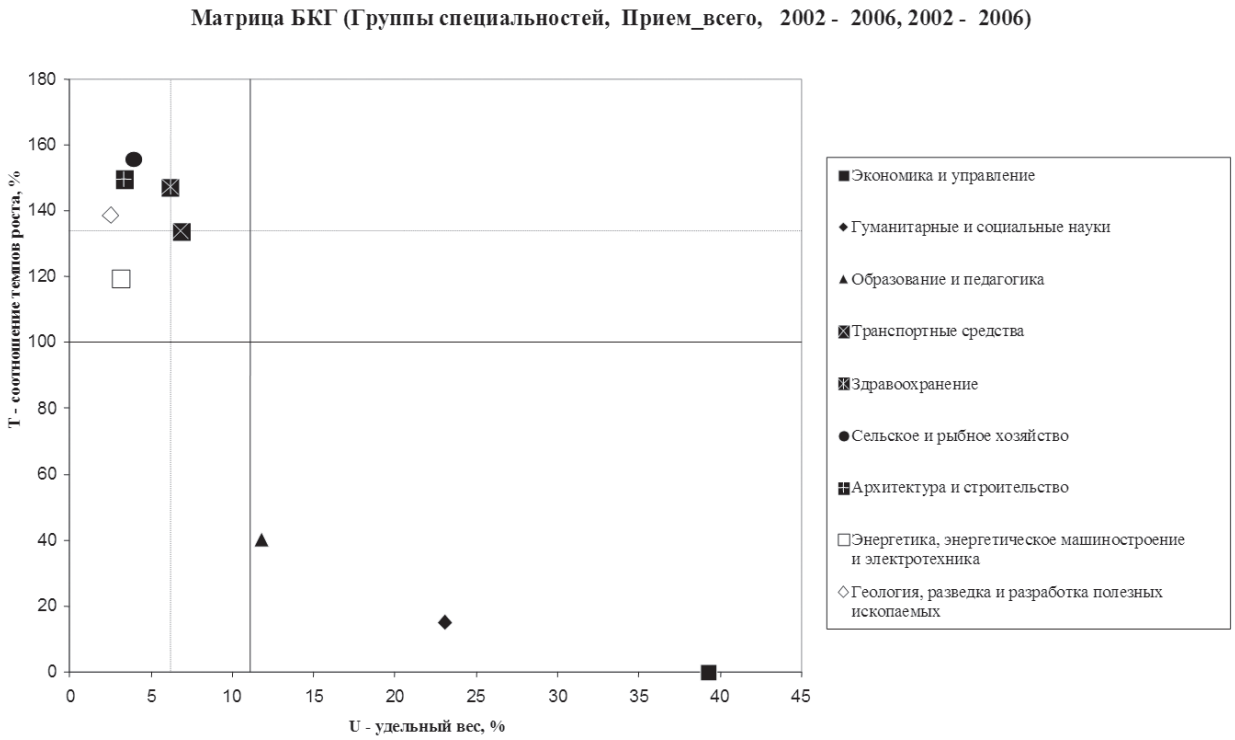


Рис. 1. Матрица БКГ по приему период с 2002 по 2006 годы.

Рис. 2. Матрица БКГ по выпуску период с 2002 по 2006 годы.

тей — «Экономика и управление», «Гуманитарные и социальные науки» и «Образование и педагогика». При этом из них выделяется «ярчайшая звезда» - это группа специальностей «Экономика и управление», занимающая около 45% рынка труда. Это отражает факт перепроизводства специалистов по данным специальностям. На четвертом месте по занимаемой доле рынка (около 5%) находится группа «Здравоохранение», а по соотношению темпов роста — «Транспортные средства». Эти группы специальностей находятся в «зоне неопределенности». Остальные группы находятся в секторе «собак». При этом группа «Архитектура и строительство» имеет нулевое соотношение темпов роста. Данное исследование по «звездам» совпадает с исследованием рынка образовательных услуг Иркутской области [3]. Темпы роста выпуска специалистов по этим направлениям превысили 350%, а доля рынка составила более 25%. Но в цитируемом исследовании третьей группой является «Энергетика и энергомашиностроение».

По результатам исследования данных о приеме при построении матрицы БКГ, в которой удельный вес определяется за 2006 год в секторе «дойных коров» находятся две группы специальностей — «Экономика и управление» и «Гуманитарные и социальные науки». При построении матрицы БКГ, в которой удельный вес определяется за период с 2002 по 2006 годы (рис. 1), в секторе «дойных коров» находится три группы специальностей — «Экономика и управление», «Гуманитарные и социальные науки», и «Образование и педагогика». В обоих случаях около 40% абитуриентов выбирают специальности, принадлежащие группе «Экономика и управление», прежде всего такие как «Экономика и управление на предприятии (по отраслям)», «Бухгалтерский учет и аудит», «Финансы и кредит», «Государственное и муниципальное управление». Группа специальностей «Гуманитарные и социальные науки» также имеет значительную долю рынка ОУ за счет специальности «Юриспруденция», которая в Читинском регионе является «ведущей» по приему на протяжении последних лет. Значительную долю рынка (7-8%) занимают группы специальностей «Здравоохранение» и «Транспортные средства». Они находится в «зоне неопределенности», прилегающей к сектору «звезды», причем как по совокупной доле рынка, так и по 2006 году. При этом соотношение темпов роста группы специальностей «Здравоохранение» примерно на 10% больше, чем группы «Транспортные средства». Также в зоне неопределенности находится группа специальностей «Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника». Остальные группы специальностей расположились в секторе «знак вопроса». Они занимают от 2% до 5% доли рынка ОУ, но при этом имеют достаточно высокие темпы роста (более 130%). Это говорит о том, что они могут перейти в сектор "звезд" при увеличении спроса на данные направления. Следует отметить, что отсутствуют группы специальностей в секторах «дойные коровы» и «звезды». В исследование [3] группы «Экономика и управление» и «Гуманитарно-социальные» находятся в секторе «звезды».

Анализ матриц БКГ по выпуску и приему отражает демографическую ситуацию в регионе. В работе [3] приведены результаты исследований рынка образовательных услуг Иркутской области за 1999-2003 годы. Объекты в матрицах БКГ всегда позиционируются вдоль главной диагонали, что свидетельствует о наличии положительной связи между показателями. В нашем случае по приему наблюдается отрицательная связь, а по выпуску — положительная. На наш взгляд это связано с началом демографического «сжатия». Для дополнительного исследования этого вопроса нами были взяты данные по приему за 2000-2006 годы. Матрица БКГ для этого случая приведена на рис. 3. Как мы видим, между показателями также наблюдается положительная связь.

Выводы.

1. При анализе системы высшего образования Читинской области по группам специальностей по выпуску в секторе «звезды» находятся три группы специальностей — «Экономика и управление», «Гуманитарные и социальные науки» и «Образование и педагогика». При этом из них выделяется «ярчайшая звезда» - это группа специальностей «Экономика и управление», занимающая около 45% рынка труда. Данное исследование по «звездам» совпадает с исследованием рынка образовательных услуг Иркутской области.

2. При исследовании по приему «звезд» не оказалось. В секторе «дойных коров» находятся три группы специальностей — «Экономика и управление», «Гуманитарные и социальные науки», и «Образование и педагогика». В «зоне неопределенности» находится группа специальностей «Энергетика, энергетическое ма-

Рис. 3. Матрица БКГ по приему за период с 2000 по 2006 годы.

шиностроение и электротехника». Остальные группы специальностей расположились в секторе «знак вопроса». В исследовании рынка образовательных услуг Иркутской области группы «Экономика и управление» и «Гуманитарно-социальные» находятся в секторе «звезды».

3. Анализ матриц БКГ по выпуску и приему отражает демографическую ситуацию в регионе. Это подтверждается тем, что при анализе приема показатели матрицы БКГ имеют отрицательную связь, а по выпуску — положительную. На наш взгляд это связано с началом демографического «сжатия». Этот тезис подтвердился при анализе данных по приему за 2000-2006 годы.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Маркова В.Д., Кузнецова С.А. Стратегический менеджмент. М.: ИНФРА - М; Новосибирск: Сибирское соглашение, 2003. — 288 с.
2. Краковский Ю.М., Карнаухова В.К., Шильке Я.Л. Трехэтапный метод оценки стратегического положения вузов на основе модели Мак-Кинси. // Университетское управление: практика и анализ. 2007. № 1 (47). С. 35-39.
3. Краковский Ю.М., Карнаухова В.К. Методы анализа и обработки данных для мониторинга регионального рынка образовательных услуг. М.: Издательский центр «МарТ», 2007. 240 с.

Демьянов В.В., Комогорцев М.Г., Марюхненко В.С. УДК 629.78.086

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Введение. При решении широкого круга транспортных задач особо важными являются вопросы определения местоположения подвижного объекта. Существующие в настоящее время наземные и бортовые системы позиционирования, основанные на использовании инерциальных систем, систем радионавигации и радиолокации, не обеспечивают точность и полноту информационно-управляющего поля [1]. Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) отличаются глобальным покрытием поверхности Земли радионавигационным полем и высокой точностью определения местоположения объекта навигации (табл.1) [2].

Анализ данных табл.1 показывает, что одним из основных источников погрешности координатных определений в СРНС является ионосферная погрешность. В отличие от других видов ошибок позиционирования, оценка ионосферной погрешности затруднена из-за сложной структуры ионосферы и процессов, протекающих в ней [3].

Целью статьи является рассмотрение влияния показателей качества СРНС на эффективность навигационно-временного обеспечения (НВО) управляемых подвижных объектов.

1. Критерий эффективности навигационно-временного обеспечения.

Критерий эффективности НВО — это показатель, который позволяет определить целесообразность применения средств и способов навигационно-временных определений в решении поставленной задачи [4, 5]. Этот критерий определяется: *точностью*, *непре-*

Табл. 1

Основные виды погрешностей псевдодальномерных измерений.

Источники погрешностей псевдодальномерных измерений в СРНС	**Средняя квадратичная погрешность определения псевдодальности, м**
Подсистема космических аппаратов	
Нестабильность частоты БЭВЧ НС	0,3...6,6
Задержка сигнала в аппаратуре НС	0,15...2,4
Неопределенность пространственного положения НС	2...9
Другие погрешности	~ 1
Подсистема контроля и управления	
Неточность предсказания эфемерид	1...9,2
Другие погрешности	1...2
Навигационная аппаратура потребителя	
Задержка сигнала в НАП	0,3...6
Шумовая и динамическая погрешности НАП	~2,9
Многолучевость	0,3...8
Тропосферная погрешность	0,7...12
Ионосферная погрешность	1,5...15
Другие погрешности	~1

рывностью и *надёжностью* навигационно-временного обеспечения.

Точность. Непосредственной мерой оценки точности координатных определений пользователя СРНС принимается текущая абсолютная погрешность определения пространственных координат

$$\Delta X_i = X_0 - X_i;\ \Delta Y_i = Y_0 - Y_i;\ \Delta Z_i = Z_0 - Z_i, \quad (1)$$

где X_0, Y_0, Z_0- истинные, а X_i, Y_i, Z_i - измеренные (вычисленные) в i-й момент времени координаты объекта в прямоугольной геоцентрической системе координат (ГЦСК).

Сферическая (пространственная) среднеквадратическая погрешность (СКП) определения местоположения потребителя навигационной информации [6]:

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\sigma_\xi^2 + \sigma_{yi}^2 + \sigma_{zi}^2\right)}, \quad (2)$$

где σ_{xi}, σ_{yi}, σ_{zi} — текущая СКП определения соответствующей координаты в прямоугольной геоцентрической системе координат для i момента времени.

Показано [1], что абсолютная погрешность определения пространственно временных координат, при помощи СРНС, подчинена нормальному закону распределения, а сферическая СКП подчинена закону распределения Вейбулла [7].

Непрерывность. Для оценки непрерывности обслуживания пользователя СРНС целесообразно ввести понятие сбоя определения координат [8]. Под сбоем подразумевается событие, заключающееся в невыполнении условия:

$$\sigma_i \le \sigma_0, \quad (3)$$

где σ_0 и σ_i — соответственно пороговое значение СКП и СКП в i-й момент времени.

Пороговое значение СКП σ_0 устанавливается на основании анализа требований к точности позиционирования объектов при решении определенной задачи. Значение σ_i — результат экспериментов.

Значение порога неприемлемой погрешности определения координат σ_0 может быть установлено на основании анализа требований к точности позиционирования объектов при решении определенной задачи.

Для оценки непрерывности радионавигационного обеспечения предложено использовать вероятностный *показатель эффективности* навигационного комплекса в j—м его состоянии [7]:

$$W_j(t) = \sum_{i=1}^{N} Э_{ji}(t)\xi_{ji}\, p_{ji}(t), \quad (4)$$

где для i-ой радионавигационной системы (РНС) при j—м её состоянии $Э_{ji}(t)$ - эффективность применения; ξ_{ji} - коэффициент показывающий относительное уменьшение зоны радионавигационного поля за счёт его пространственно-временной неоднородности; $p_{ji}(t)$- вероятность существования.

Надежность. Качество НВО напрямую зависит от надёжности работы СРНС. Под надежностью навигационного обеспечения понимается вероятность выполнения задач системой «экипаж — транспортное средство». В зависимости от целей исследования, в качестве таких задач обычно рассматриваются: нахождение подвижного объекта в пределах параллелепипеда безопасности со сторонами, определенными нормами безопасного эшелонирования и выдерживание программной траектории движения или вывод подвижного объекта на заданный пункт по месту и в назначенное время (оценка качества управления движением).

Надежность навигации подвижных объектов при решении прикладных задач в [2] предлагается оценивать вероятностным показателем

$$W = \sum_{i=1}^{n}\left[P_{пр}(A)P_{обс}(Б/A)P_T(B/A,Б)\right]_j, \quad (5)$$

где A - событие заключающееся в функционировании навигационной системы с наперёд заданным качеством; $Б$ - событие заключающееся в эффективной работе экипажа; B — событие заключающееся в решении основной задачи; $P_{ПР}(A)$, $P_{обс}(Б/A)$, $P_T(B/A,Б)$ — вероятности (условные вероятности) наступления событий A,$Б$ и B соответственно; j — номер несовместного работоспособного режима работы навигационной системы.

Знак суммы в формуле учитывает наличие резервных связей в навигационной системе, позволяющих осуществлять комплексное управление транспортным средством. Полученное выражение учитывает широкий круг факторов, влияющих на надежность навигации.

В соответствии с этим первый сомножитель формулы (5) $P_{пр}(A)$ учитывает: безотказность работы навигационной аппаратуры; конструктивные ограничения в области применения средств; пропускную способность навигационной аппаратуры; возможность обнаружения и опознания внешних источников навигационной информации; способность

нормального функционирования системы в условиях воздействия искусственных и естественных помех различной интенсивности [3].

Второй сомножитель формулы (5) характеризует степень автоматизации обслуживания навигационной системы и роль человека-оператора в этом процессе. Здесь возможны три ситуации: когда работа системы обслуживается автоматически; квалифицированно обслуживается экипажем; не обслуживается автоматически, а экипаж не имеет возможности и, может быть, достаточных знаний и умения для обеспечения ее бесперебойной работы. В этом случае полная вероятность обслуживания

$$P_{обс}(Б/А)=\begin{cases}1-(1-P_{авт})(1-P_{ЭК}),\\ 1-(1-P_{авт})(1-(1-KP_{авт})P_{ЭК}),\end{cases} \quad (6)$$

где $P_{авт}$ — вероятность автоматического обслуживания навигационной системы на всех этапах полета; $P_{эк}$ — вероятность квалифицированного обслуживания навигационной системы экипажем; K — коэффициент, характеризующий возможность контроля за автоматикой со стороны экипажа.

Первое равенство зависимости (6) соответствует случаю, когда экипаж немедленно включается в обслуживание навигационных средств, как только отказала система автоматики, т. е. отказ автоматического обеспечения работы навигационной системы проявляется отчетливо и от экипажа не требуется специального его распознавания.

Второе равенство выражения (6) соответствует случаю, когда отказ автоматики проявляется не явно и для его распознавания требуется выполнение каких-то мероприятий, например косвенной проверки работоспособности, применения специальной системы автоконтроля и сигнализации отказов, которая не в полной мере выявляет состояние навигационной системы. Качество работы системы контроля со стороны автоматики или экипажа показывает коэффициент K, принимающий значения от 1 до 0. Если коэффициент $K=0$, что соответствует безошибочному распознаванию отказа автоматики, то второе равенство формулы (6) обращается в первое. Если же $K=1$, то экипаж включается в работу по обеспечению навигационной системы с несколько заниженной вероятностью $(1—P_{авт})P_{ЭК}$, зависящей от неопределенности состояния. На основе оценки показателя вероятности $P_{обс}(Б/А)$ можно определить целесообразный состав экипажа для данного типа транспорта, необходимость наличия штурмана на борту, потребный уровень теоретических знаний экипажа и практических навыков работы с аппаратурой, а также требования к системе автоконтроля.

Третий сомножитель формулы (5) $P_T(В/А,Б)$ учитывает точность работы навигационной аппаратуры, обеспечивающей выдерживание движения по программной траектории. При оценке безопасности движения, когда решается задача нахождения подвижного объекта в параллелепипеде безопасности, учитываются вероятности выдерживания соответствующих норм эшелонирования. Тогда в случае независимости погрешностей определения и выдерживания соответствующих параметров навигационного режима движения будет иметь место равенство

$$P_T(В/А,Б)=P_{TH}\,P_{TS}P_{TZ}, \quad (7)$$

в правой части которого приведены вероятности выдерживания заданных норм эшелонирования по вертикальной, продольной и боковой осям системы координат.

Используя положения теории вероятностей возможно количественно оценить третьей сомножитель формулы (5). Вероятность нахождения случайной величины X^* в пределах от α до β равна

$$P\{\alpha<X^{\cdot}<\beta\}=\int_{\alpha}^{\beta}f(X)dX=\int_{0}^{\beta}f(X)dX-\int_{0}^{\alpha}f(X)dX. \quad (8)$$

где $f(X)$ — плотность распределения случайной величины X^*.

Исследования показывают, что большинство навигационных погрешностей подчиняется нормальному закону распределения [1, 3], который характеризуется дифференциальной функцией распределения с математическим ожиданием m_x и средним квадратическим отклонением (СКО) σ_X:

$$f(X)=(\sigma_X\sqrt{2\pi})^{-1}\exp\left[-(X-m_X)^2/2\sigma_X^2\right]. \quad (9)$$

Учитывая, что вышеприведенные интегралы для нормального закона распределения в элементарных функциях не выражаются, при практических расчетах используются таблицы функции Лапласа:

$$\Phi(X)=(2/\sqrt{2\pi})\int_{0}^{X}\exp(-t^2/2)dt, \quad (10)$$
$$t=(X-m_X)/\sigma_X.$$

Таким образом, расчетная формула вероятности попадания случайной величины X^*,

подчиненной нормальному закону распределения, на участке от α до β

$$P\left\{\alpha < X^* < \beta\right\} = 0.5\left[\Phi\left(\frac{\beta - m_X}{\sigma_X}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - m_X}{\sigma_X}\right)\right]. \quad (11)$$

Функция Лапласа является нечетной, т.е. $\Phi(-X) = -\Phi(X)$. Тогда для симметричного относительно оси ординат $(X=0)$ расположения пределов $|\alpha| = |\beta|$ последняя формула упростится:

$$P\left\{-\alpha < X^* < \alpha\right\} = 0.5\left[\Phi\left(\frac{\alpha - m_X}{\sigma_X}\right) + \Phi\left(\frac{\alpha + m_X}{\sigma_X}\right)\right]. \quad (12)$$

Если математическое ожидание $m_x=0$, то исходная формула (11) упростится:

$$P_T = P\left\{-\alpha < X^* < \alpha\right\} = \Phi\left(\frac{\alpha}{\sigma_X}\right). \quad (13)$$

Погрешности навигационных измерений содержат постоянную и переменную составляющие. Для повышения точности измерений первая из них обычно компенсируется или учитывается в расчетах, и таким образом устраняется ее влияние на результат. В соответствии с этим вместо средних квадратических отклонений (СКО) применяются среднеквадратические погрешности (СКП), сохраняя тот же символ σ.

Применительно к передвижению по трассам шириной $2b$ формулы (12) и (13) запишутся как

$$P_T(B/A, Б) = P_{ПР} = \begin{cases} 0.5\left[\Phi\left(\frac{b - \Delta Z}{\sigma_{Z\Sigma}}\right) + \Phi\left(\frac{b + \Delta Z}{\sigma_{Z\Sigma}}\right)\right], \\ \Phi\left(\frac{b}{\sigma_Z \Sigma}\right), \end{cases} \quad (14)$$

где b — половина ширины трассы; ΔZ — систематическая погрешность НВО, определяемая характером линии заданного (фактического) пути; $\sigma_{Z\Sigma}$ — суммарная СКП боковой ошибки управления движением.

Если принять, $P_{n\text{р}}(A) \sim W_j(t)$ и то, что навигационная система достаточно автоматизирована, то можно принять $P_{ОБС} = 1$ и формулу (5) можно записать в упрощенном виде:

$$W = \sum_{j=1}^{c}\left[W_j(t) P_T(B / A, Б)\right]. \quad (15)$$

При отсутствии резервных связей ($c = 1$), т. е. когда навигационной системы, как таковой, нет, а на борту имеется набор навигационных средств, расчет надежности навигации производится по видоизмененной формуле (5) [2]:

$$W = W_j P_{ЭК}(Б/A) P_T(B/A, Б). \quad (16)$$

В некоторых случаях бывает достаточно дать оценку только вероятности выдерживания соответствующего интервала эшелонирования P_m, что имеет место при сравнительно высоких значениях вероятности применения всей навигационной аппаратуры, имеющейся на борту ($P \approx 1$). Приняв подобное допущение, расчет надежности навигации при обеспечении выдерживания заданной траектории движения может производиться по упрощенным формулам (14). Из них видно, что вероятность выдерживания заданной траектории движения (надежность навигации) зависит при $b = const$ от систематической погрешности ΔZ, возникающей при выдерживании любой линии пути, отличной от ортодромии, и суммарной средней квадратической погрешности НВО - $\sigma_{Z\Sigma}$. Зная ΔZ и $\sigma_{Z\Sigma}$, а при $\Delta Z = 0$ — только $\sigma_{Z\Sigma}$ можно для данной траектории движения рассчитать вероятность ее выдерживания.

При решении некоторых прикладных задач, особенно при сравнительной оценке выполнения частных навигационных задач, ограничиваются анализом средних квадратических погрешностей определения местоположения.

В зависимости от характера исследуемых навигационных задач могут применяться различные критерии оценки влияния навигационного комплекса на эффективность решения поставленных задач. При этом наиболее полную характеристику дает надежность навигации, которая учитывает наибольшее число влияющих факторов. Если вероятность применения навигационных средств велика или она не оказывает заметного влияния на результат, то ограничиваются только расчетом вероятности выдерживания заданной траектории движения. Для сравнительной оценки средств и способов навигационного обеспечения управления движением бывает достаточным рассмотрение только среднеквадратических погрешностей определения местоположения.

2. Методики оценки влияния навигационного комплекса на эффективность решения прикладных задач.

Получение оценки надежности НВО предполагает использование результатов экспериментальной оценки вероятностных характеристик погрешностей НВО, представленных

выше. Опираясь на полученные экспериментальные вероятностные оценки, надежность навигационного обеспечения можно оценить как полную вероятность выполнения поставленной задачи на требуемом уровне с использованием бортовой аппаратуры СРНС:

$$W = W_j P(B/A), \qquad (17)$$

где W_j - показатель эффективности, оцениваемый по формуле (4); *P(B/A)*—условная вероятность, учитывающая точность работы навигационной аппаратуры в процессе решения основной задачи (событие *B*).

Для выяснения значений W_j требуется использовать полную математическую модель погрешностей измерения основных радионавигационных параметров (РНП) - псевдодальностей до НС, находящихся в пределах видимости пользователя СРНС. На основании этой модели можно оценить как вероятность нормального функционирования навигационной аппаратуры СРНС W_j в заданных условиях, так и получить текущие оценки точности НВО (модельные выборки значений ΔX_i, ΔY_i, ΔZ_i и σ_i). Полученные при использовании модели измерений РНП данные подвергаются далее обработке в соответствии с методикой описанной в [1], а полученные в результате этого выборочные оценки используются в качестве исходных данных в выражениях (7), (8).

Сомножитель формулы (17) *P(B/A)* учитывает точность работы навигационной аппаратуры, обеспечивающей выдерживание движения по заданной траектории. При оценке безопасности движения, когда решается задача нахождения подвижного объекта в параллелепипеде безопасности, учитываются вероятности выдерживания соответствующих норм эшелонирования. Тогда в случае независимости погрешностей определения и выдерживания соответствующих параметров навигационного режима движения будет иметь место равенство

$$P_T(B/A) = P_{TX} P_{TY} P_{TZ}, \qquad (18)$$

в правой части которого приведены вероятности выдерживания заданных норм эшелонирования по вертикальной, продольной и боковой осям ортодромической системы координат.

Для сравнительной оценки средств и способов навигационного обеспечения управления движением бывает достаточным рассмотрение только среднеквадратических погрешностей определения местоположения. Поэтому здесь ограничимся анализом сферической СКП - σ_i. При оценке вероятности обеспечения точности НВО по величине текущих значений σ_i искомые значения $P_T(B/A)$ могут быть вычислены на основании теоретического закона распределения σ_i Вейбулла.

Выводы. Рассмотренная методика оценки качества НВО позволяет количественно оценить эффективность применения СРНС для решения прикладных навигационных задач; позволяет сравнивать различные технические устройства, системы и комплексы с целью выбора наиболее оптимального типа аппаратуры для заданных условий функционирования.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Демьянов В. В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Иркутский государственный университет. Иркутск, 2000г. - 156 с.
2. Харисов В. Н., Перов А. И., Болдин В. А. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ - М.: ИПРЖР, 1998, 400 с.
3. Afraimovich E.L., Lesyuta O.S., Ushakov I.I. and Voeykov S.V. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals. Annals of Geophysics, 2002, V. 45, N 1, P. 55-71.
4. Шебшаевич В. С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. — М.: Радио и связь, 1982. 272с.
5. Марюхненко В.С. Оценка точности определения координат объектов с известной траекторией движения // Авиакосмическое приборостроение. 2006, №7. - С.43—46
6. Болдин В. А. Зарубежные глобальные системы навигации. — М.: Изд-во ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1986. - 216 с.
7. Кондакова Т.Н. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Иркутский государственный университет. Иркутск. - 2002. - 174 с.
8. Марюхненко В.С., Мухопад Ю. Ф. Информационная оценка навигационных измерений в условиях априорной неопределенности // Электромагнитные волны и электронные системы». 2006, №10. — С.55—61.

Краковская Т.А., Тюрнев А.С. УДК 331.108.4:519

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ МАРКЕТИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последние годы в нашей стране под влиянием модернизации системы образования стало уделяться особое внимание исследованию процессов, происходящих внутри самой этой системы. Но так как образовательные учреждения вовлечены не только в систему образования, но и принимают активное участие на рынке образовательных услуг, то необходимо дополнительно исследовать и сам этот рынок.

Исследованием рынка занимается специальная наука — маркетинг. Маркетологи исследуют сам рынок, предприятия, товары и услуги, представленные на рынке. С помощью специальных методов определяются конкурентные преимущества, исследуются спрос и предложение, перспективы развития в том или ином направлении, производится стратегическое позиционирование и планирование и т.д. Для этого разработаны специальные математические модели и показатели. Но так как процесс расчёта тех или иных показателей при исследовании рынка в целом или отдельных его составляющих может быть достаточно трудоёмким, то чаще для такого анализа используются специально разработанные программные продукты.

Дадим сравнительный анализ основных программных продуктов.

ALS-Base.

Эта программа позволяет оценивать показатель конкурентоспособности любого товара вашего предприятия на рынке на основе SWOT-анализа

Marketing Analytic 4.

Разработчик предлагает не просто набор программ, решающих разрозненные задачи, стоящие перед маркетологами, а интегрированную информационно-аналитическую систему, позволяющую реализовать комплексный подход к управлению маркетинговой деятельностью предприятия на всех ее этапах [1]. Программа предназначена для решения задач накопления данных, автоматизации маркетинговых исследований, стратегического и оперативного планирования маркетинговой деятельности.

Модуль **Portfolio** (автоматизация решения задач стратегического маркетинга).Подготовка данных для портфельного анализа: обработка результатов экспертных опросов и объективной рыночной информации, проведение SWOT-анализа и анализа привлекательности. Построение стандартных матриц портфельного анализа (BCG (БКГ), DPM) и матриц с произвольными измерениями для нескольких временных интервалов.

Marketing Expert™ (Про-Инвест ИТ).

Программа позволяет оценить реальное положение компании на рынке, провести сравнительный анализ ее сбытовой деятельности с конкурентами, сформировать оптимальную структуру сбыта. Система позволяет определить доходность различных сегментов рынка и товаров, долю рынка компании и темпы ее роста. Применение общепринятых аналитических методик (GAP-анализ, сегментный анализ, SWOT-анализ, Portfolio-анализ) оказывает неоценимую помощь при разработке оптимальной стратегии и тактики работы компании на рынке, оценке рисков и расчет основных плановых финансовых результатов [2].

Power analysis (StatSoft Russia).

Анализ мощности — это наиболее полная реализация всех современных методов планирования статистических исследований, позволяющая выбрать оптимальные размеры выборок, необходимых для получения надежных результатов. Точность вычислений программы предоставляет уникальные возможности для расчета необходимых значений.

В системе STATISTICA Анализ мощности использован современный подход к получению интервальных оценок. Это единственная статистическая программа, которая умеет вычислять доверительные интервалы для таких важных статистических характеристик, как стандартизованные эффекты (для t-критериев и дисперсионного анализа), коэффициенты корреляции, квадраты коэффициентов множественной корреляции, доля выборки и разность между долями (для зависимых или независимых выборок). Это, в свою очередь, дает возможность строить доверительные интервалы для мощности и размера выборки на основе предварительных экспериментов.

БЭСТ-Маркетинг ("Интеллект-Сервис").

Программная система "БЭСТ-Маркетинг" представляет собой удобный и эффективный инструментарий, позволяющий оценить рыночные позиции предприятия в условиях конкуренции. Система может использоваться на предприятиях производства, торговли и сферы услуг [3].

Вводимые качественные данные преобразуются системой в количественные, что позволяет проводить соответствующие расчеты. В числе методик, на которых базируется "БЭСТ-Маркетинг" — SWOT-анализ и модель Розенберга, метод 4P, матрица Ансоффа.

Возможности системы "БЭСТ-Маркетинг" обеспечивают ряд процедур.

Анализ рынка:

— определение перспективных рыночных ниш;

— анализ конкурентоспособности товара;

— анализ рекламы, рекомендации по повышению ее эффективности;

— рекомендации по стимулированию продаж.

Анализ конкурентов:

— степень присутствия конкурентов на рынке;

— сравнительный анализ по товару;

— сравнительный анализ рекламных компаний.

Финансовое планирование маркетинговой деятельности:

— прогноз продаж;

— бюджет рекламы;

— сводный бюджет;

— подготовка бюджета затрат по продвижению продукции и контроль за его исполнением.

КонСи-SWOT анализ (KonSi).

В технологиях позиционирования товара воплощен опыт зарубежных маркетологов, которые занимаются позиционированием товара. Позиционирование товара может быть проведено с помощью двух подходов [4]:

— стратегическое позиционирование товара (макро-позиционирование);

— тактическое позиционирование товара (микро-позиционирование)

Стратегическое позиционирование товара предполагает проведение SWOT-анализа позиционируемого товара на рынке. Проводится SWOT-анализ позиционируемого товара и одновременно проводится SWOT-анализ товара-конкурента. Выделяются сильные, слабые стороны, возможности и угрозы. Результаты SWOT-анализа используются для определения позиции товара на рынка и его положения относительного товара конкурента. Анализ проводится на основе экспертной информации и/или в процессе "мозгового штурма". Тактическое позиционирование товара (микро-детальное позиционирование товара) проводится на основе тщательного изучения мнений покупателей о позиционируемом товаре. Позиционирование товара предусматривает выполнение следующих этапов.

Этап 1. Проведение анкетирования покупателей с помощью специального типа анкеты. Для разработки данной анкеты применяется программное обеспечение

Этап 2. Обработка заполненных анкет о позиционируемом товаре. При обработке анкет с помощью кластерного анализа и факторного анализа выделяются сегменты покупателей. А затем на выделенных сегментах с применением факторного анализа мнений покупателей о товаре и товаре конкуренте определяются позиции сопоставляемых товаров.

Этап 3. Собственно позиционирование товара с помощью анализа построенной карты позиционирования товара. Анализ позволяет предложить тактические действия по позиционированию товара или по репозиционированию товара. Определяются лучшее положение товара относительно сегментов рынка и позиций товаров конкурентов.

Выделение сегментов покупателей с помощью кластерного анализа и факторного анализа выполняется с помощью программного обеспечения КонСи-Сегментирование рынка, в котором присутствует модуль для позици-

онирования товара, позволяющий построить карту позиционирования товара КонСи-Модуль Позиционирование товара.

КонСи-сегментирование (KonSi).

Технология предназначена для маркетологов, перед которыми заказчик поставил задачу изучения сегментной структуры рынка. Для анализа рынка используются анкетные данные (результаты опросов или выборки из баз данных ваших клиентов — datamining) [5].

Реализованы методы изучения выделенных целевых сегментов:

— профили потребителей,

— позиционирование товаров на картах восприятия/предпочтений,

— матрицы стратегического потенциала сегментов (порт-фолио)

Результаты исследований отображаются в трехмерной графике (3D) и выводятся в виде таблиц Excel. Это позволяет легко включить полученные вами результаты сегментного анализа в маркетинговые отчеты.

КонСи-Multi SWOT Analysis (KonSi).

Бенчмаркинг нескольких однотипных прямых конкурентов проводится с применением технологии SWOT-анализа. Программа позволяет провести бенчмаркинг (сравнение конкурентов) с позиций классических принципов SWOT-анализа и стратегического планирования [4]. Технология бенчмаркинга может быть проведена с применением программы KonSi-Multi SWOT Analysis.

КАСАТКА-ПРОФ (Kasatka Consulting Group).

Программный продукт "Касатка" является маркетинговой системой управления предприятием и прибылью [6]. И улучшает понимание и коммуникации между уровнями власти. В продукте есть три больших комплекса: комплекс стратегического планирования, комплекс менеджмента и комплекс маркетинга. Вся программа разделена на две больших части: качественную и количественную.

Качественная часть — это система поддержки принятия решений, реализованная через систему составления качественных документов. Количественная часть — это та часть программы, где есть большое количество экономических расчетов по маркетингу, менеджменту и экономике, а также бизнес-план.

Комплекс стратегического планирования, менеджмента и маркетинга

— Формирование миссии и корпоративной культуры организации;

— Постановка корпоративных целей и целей отдельных проектов;

— Ситуационный анализ, SWOT-анализ;

— Формирование хозяйственного портфеля, выбор корпоративной стратегии;

— Определение стратегии, тактики, политики, процедур и правил для каждого проекта; Маркетинг;

— Оценка соответствия организационной структуры стратегическим планам;

— Логика и иерархия целей, привязка их к проектам, объектам и менеджерам;

— Оценка и корректировка стратегического плана.

— Анализ конкурентоспособности предприятия на рынке;

— Анализ конкурентоспособности товара

Маркетинг-аналитика (СКИП).

В программе реализованы уникальные возможности построения необходимых для пользователя структурных схем, по проведению маркетинговых исследований практически во всех областях производства, сфере торговли и оказания услуг [7].

Функциональные возможности [8]:

— оценка конкурентоспособности (товара, предприятия):

— оценки экспертов;

— удельный вес параметров;

— единичные и групповые показатели конкурентоспособности;

— расчет показателя по пользовательским параметрам;

— расчет показателя по экономическим параметрам;

— расчет интегрального показателя конкурентоспособности;

— вывод о конкурентоспособности;

— корреляционный анализ:

Критерии:

— среднеквадратичное отклонение;

— значение среднеквадратичной ошибки коэффициента парной корреляции;

— значение t-критерия Стьюдента;

— квадратичное отклонение;

— аналитико-иерархическая декомпозиция:

— шкала попарного суждения;

— матрица парного сравнения по суждениям;

— нормальная матрица сравнения по суждениям;

— индекс состоятельности;

— значение случайного индекса;

— уровень состоятельности CR.

МаркетингМикс 3 (Корпоративные финансы).

МаркетингМикс — это универсальный инструмент для разработки маркетингового плана [9]. Комплекс представляет собой набор шаблонов для работы в SM Office (анализ конкурентных преимуществ компании, SWOT-анализ, анализ "Рост/Доля" рынка (матрица БКГ), анализ рыночной привлекательности (матрица GE/McKinsey — модель Мак-Кинси), маркетинговый бюджет, шаблоны маркетингового плана, динамика продаж, структура продаж, анализ конкурентов). Профессиональная версия содержит, также, инструментарий прогнозирования и оперативного управления реализацией маркетинговых стратегий.

В таблице 1 приведён сравнительный анализ приведенных программ по стоимости. В таблице 2 приведен сравнительный анализ вышеперечисленныхпрограммных продуктов по функциональным возможностям и применяемым методам. По информации этих таблиц видно, что достаточно хорошо проработанные комплексы, позволяющие решать широкий круг маркетинговых задач, имеет и высокую стоимость. Бесплатные или достаточно недорогие программы реализуют лишь ограниченный набор методов.

Как видно из таблицы 2, большинство программ для маркетинговых исследований используют SWOT-анализ предприятий. Экспертные данные привлекаются для исследований примерно в половине из программ. Широкий набор статистических критериев представлен только в дополнении к пакету STATISTIKA — Power analysis.

В этом пакете существует также мощный аппарат для работы с регрессионным, дисперсионным анализом, а также методы шкалирования. Для позиционирования товаров применяются различные методы, но только

Табл. 1

Сравнительный анализ программных продуктов по ценам.

Программный продукт	Цена (с ценами на модули)	Цена за комплекс в рублях
ALS-Base	бесплатно	бесплатно
Marketing Analytic 4	модуль Portfolio $300 за каждое рабочее место	8.000
Marketing Expert™	не распространяется, не поддерживается	-
Power analysis	$505 + пакет STATISTIKA Base $445	25.365
БЭСТ-Маркетинг	1.600 руб.	1.600
КонСи-сегментирование	Demo-версия бесплатно	Demo-версия бесплатно
КАСАТКА-ПРОФ	от $1.100	29.370
Маркетинг-аналитика	бесплатно	бесплатно
КонСи-SWOT анализ	Demo-версия бесплатно	Demo-версия бесплатно
КонСи-Multi SWOT Analysis	Demo-версия бесплатно	Demo-версия бесплатно
Система "Маркетинг Микс 3"	1.350 руб.	1.350
Система "Маркетинг Микс 3 Проф."	2.720 руб.	2.710

Табл. 1

Сравнительный анализ программных продуктов для маркетинга.

Программный продукт	SWOT-анализ	Оценка графики	Экспертные данные	BCG	DPM/ McKinsey	Стат. критерии	Достоверность данных	Регрессионные модели	Шкалирование (ранжирование)	Позиционирование товара	Data mining
ALS-Base	+	Средняя	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marketing Analytic 4	+	Высокая	+	+	+	-	-	-	-	+	-
Marketing Expert™	+	Средняя	-	-	+	-	-	-	+	+	-
Power analysis	-	Высокая	-	-	-	+	-	+	+	-	-
БЭСТ-Маркетинг	+	Средняя	-	-	-	-	-	-	-	+	-
КонСи-сегментирование	-	Высокая	+	+	-	-	-	-	-	+	+
КАСАТКА-ПРОФ	+	Высокая	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Маркетинг-аналитика	-	Средняя	+	-	-	+	-	+	-	+	-
КонСи-SWOT анализ	+	Высокая	+	-	-	-	-	+	-	-	-
КонСи-Multi SWOT Analysis	+	Высокая	-	-	-	-	-	-	-	-	-
aspalphaМаркетинг Микс 3	+	Нет	-	+	+	-	-	-	-	+	-

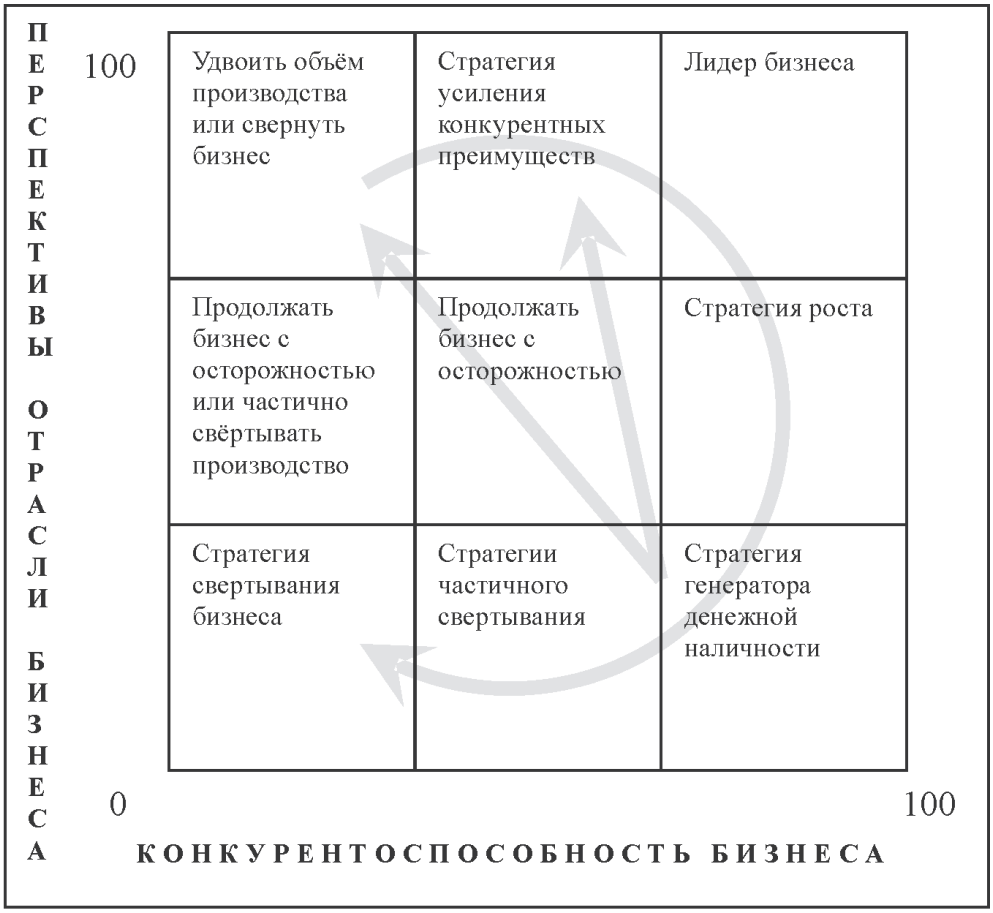


Рис 1. Представление модели Shell/DPM.

Marketing Analytic 4 и Marketing Expert™ используют для этого матрицы BCG (БКГ) и DPM.

Матрица DPM (Shell) внешне похожа на матрицу McKinsey (General Electric), и также является своеобразным развитием идеи стратегического позиционирования бизнеса, заложенной в основу модели BCG [10]. Вместе с тем, между ними имеются принципиальные различия. Но по сравнению с однофакторной BCG 2x2 матрицей, матрица DPM (как и матрица McKinsey), является двухфакторной матрицей размерности 3x3, базирующейся на множественных оценках как качественных, так и количественных параметров бизнеса. Более того, мультипеременный подход, используемый для оценки стратегических позиций бизнеса в моделях McKinsey и DPM, оказался на практике более реалистичным, чем подход, используемый матрицей BCG. Как и все прочие классические модели стратегического планирования, модель DPM представляет двумерную таблицу, где оси X и Y отражают соответственно сильные стороны предприятия (конкурентная позиция) и отраслевую (продукт-рынок) привлекательность (Рис. 1). Точнее, ось X отражает конкурентоспособность бизнес-сектора компании (или его способность извлекать преимущества из тех возможностей, которые имеются в соответствующей бизнес-области). Ось Y таким образом является общим измерением состояния и перспектив отрасли.

Разбиение модели DPM на 9 клеток (в виде матрицы 3x3) сделано не случайно. Каждая из 9 клеток соответствует специфической стратегии:

— "Лидер бизнеса"

— "Стратегия роста"

— "Стратегии генератора денежной наличности"

— "Стратегия усиления конкурентных преимуществ"

— "Продолжать бизнес с осторожностью"

— "Стратегии частичного свертывания"

— "Удвоить объём производства или свернуть бизнес"

— "Продолжать бизнес с осторожностью или частично свёртывать производство"

— "Стратегия свертывания бизнеса"

Несмотря на преимущества модели DPM как матрицы многопараметрического стратегического анализа, её популярность оказалась ограниченной рамками ряда очень капиталоёмких отраслей промышленности, таких как химическая, нефтепереработка, металлургия. Для такой отрасли как образование лучше использовать модель McKinsey.

Таким образом, для эффективного стратегического позиционирования объектов на рынке образовательных услуг можно определить набор необходимых для исследования инструментов:

— система мониторинга для сбора статистических данных;

— система обработки статистических данных;

— модель БКГ (для определения ведущих объектов на основе статистических данных);

— привлечение экспертов для оценивания конкурентоспособности и привлекательности объектов;

— система обработки экспертной информации;

— модель расчёта весовых коэффициентов (например, МАИ);

— модель Мак-Кинси для позиционирования объектов;

— ряд статистических критериев оценки качества экспертных оценок;

— возможность ранжировки данных;

— построение наглядных отчётов (графиков, таблиц и т.п.)

Как видно из таблицы 2, ни один из приведённых программных продуктов не обладает набором этих моделей и методов. Поэтому целесообразно создать программный комплекс, в котором был бы реализован спектр маркетинговых средств для стратегического позиционирования.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Программный комплекс Marketing Analytic [Электронный ресурс] — Компания КУРС. — http://www.curs.ru/products/index.shtml.
2. Описание программы Marketing Expert™ [Электронный ресурс] — Группа компаний Про-Инвест. — http://www.expert-systems.com.
3. Программа БЭСТ-Маркетинг [Электронный ресурс] — Компания БЭСТ. — http://www.bestnet.ru/prog_7.htm.
4. SWOT анализ [Электронный ресурс] — Компания KonSi. — http://www.swot-analysis.ru.
5. Лучшая программа для сегментирования ранка и позиционирования товара [Электронный ресурс] — Компания KonSi. — http://www.marketing-soft.ru/segmentation/segmentation_1.html.
6. Современные экспертные системы в области маркетинга, менеджмента и экономики [Электронный ресурс] — Kasatka Consulting Group. — http://www.kasatka.ru.
7. Стиль жизни: Программы для торговли [Электронный ресурс] — Лицензионные программы. — http://moresofta.ru/more.php?l=20&k2=1674653642.
8. Возможности программы Маркетинг аналитика [Электронный ресурс] — Лицензионное программное обеспечение. — http://allsoft.ru/program_page.php?grp=11241&partner=1545.
9. Описание программы МаркетингМикс 3 [Электронный ресурс] — **AUP.Ru** — Бизнес-портал менеджеров, маркетологов, экономистов и финансистов. — http://www.aup.ru/products/kf/mmix.
10. Ефремов В. С. Стратегия бизнеса. Концепции и методы планирования / Учебное пособие. — М.: Издательство "Финпресс", 1998.

Рябов Е.В., Китов Б.И., Мухачев Ю.С.

УДК 622.44

АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕНТГЕНОРАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДОВОДКИ КОНЦЕНТРАТОВ

Автоматическое обнаружение и извлечение полезного компонента из потока смеси кусков различных веществ относится к важнейшим задачам горнообогатительной, алмазодобывающей, угольной промышленности [1,2]. Оно применяется при при очистке зерна и корнеплодов от посторонних включений, при переработке вторичного металлургического сырья.

При значительном отличии средних атомных номеров полезного и сопутствующего компонентов кусковой смеси перспективной технологией обнаружения является рентгеноабсорбционный метод , так как лежащий в его основе закон зависимости коэффициента фотоэлектрического поглощения от атомного номера $\tau \approx Const \cdot \lambda^3 \cdot z^4$, указывает на высокую чувствительность интенсивности прошедшего рентгеновского излучения, к вещественной принадлежности обьекта.

Однако метод оказался хорош только при фиксированном положении анализируемого объекта относительно источника и детектора излучения. При свободном же движении объекта в пространстве, например при его движении по ленте транспортера, при движении по наклонному лотку или при свободном падении объекта через зону анализа, площадь облучения его поверхности изменяется случайным образом в весьма широких пределах, сводя к нулю преимущества метода.

Для решения этой проблемы предлагается отказаться от регистрации прошедшего через объект первичного рентгеновского излучения, заменив его регистрацией рассеянного излучения под небольшим углом в прямом направлении. Из экспериментов по измерению атомных констант известно, что при энергиях больших 20 кэВ атомные коэффициенты рассеяния не столь сильно зависят от атомного номера, как атомные коэффициенты фотоэлектрического поглощения [3]. Если первые для легких и тяжелых элементов отличаются примерно в 8-10 раз, то вторые отличаются в 500-1000 раз. Поэтому интенсивность рассеянного излучения определяется не столь рассеивающей способностью вещества, как поглощением рассеянного излучения при выходе из этого вещества.

Рентгенооптическая схема (РОС), схема тракта регистрации и схема блока управления приведены на рис.1.

Кроме рассеянного рентгеновского излучения от объекта, регистрируется рассеянное рентгеновское излучение от рассеивающего экрана, выполненного из материала с низким атомным номером, установленного между объектом и детектором.

При таком расположении экрана сигнал детектора представляет собой сумму постоянной и импульсной составляющих.

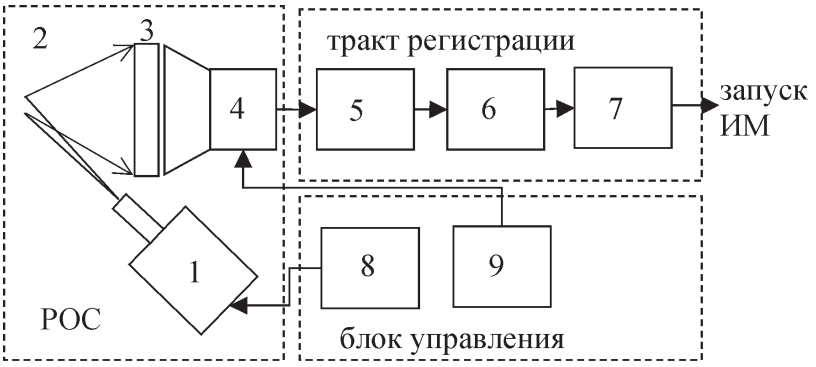


Рис. 1. Структурная схема системы обнаружения РРС. 1-источник рентгеновского излучения; 2-рассеивающий экран; 3- сцинтиллятор; 4-фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 5- предварительный усилитель (ПУ); 6-блок обработки сигнала; 7-блок разделения сигналов; 8-блок управления рентгеновским излучателем; 9-блок питания ФЭУ.

Постоянная составляющая формируется рассеянным рентгеновским излучением от экрана и зависит от интенсивности первичного рентгеновского излучения и поверхностной плотности вещества экрана. Импульсная составляющая сигнала формируется при пересечении объектном компонента пучка первичных рентгеновских лучей.

При прохождении объекта через пучок первичных рентгеновских лучей наблюдается два различных процесса: во-первых, объект рассеивает первичное рентгеновское излучение, часть которого попадает на детектор и суммируется с постоянной составляющей, во-вторых, объект перекрывает часть рентгеновского пучка, в результате чего уменьшается интенсивность излучения, падающего на дополнительный экран, а следовательно уменьшается интенсивность сигнала от этого экрана.

Таким образом результирующий сигнал детектора представляет собой сумму трех составляющих

$$U_{сигн} = U_{экр} + U_{расс.} - U_{погл.},$$

где $U_{сигн}$- результирующий сигнал детектора,

$U_{экр}$ — постоянный сигнал рассеяния дополнительного экрана,

$U_{расс}$ — импульсный сигнал рассеяния объектна компонента,

$U_{погл.}$ — импульсный сигнал поглощения первичного излучения объектном компонента.

В отсутствии объекта в зоне анализа наблюдается постоянный во времени фоновый сигнал $U_{экр}$, определяемый интенсивностью первичного рентгеновского излучения и поверхностной плотностью дополнительного экрана.

При прохождении в зоне облучения объекта с низким атомным номером, например алмаза, сигнал рассеянного излучения $U_{расс}$ совпадает по знаку с сигналом фона образованного рассеянием на экране, и имеет значительную величину вследствие того, что излучение рассеянное на объекте проходит через его вещество практически без ослабления . Кроме того, объект с низким атомным номером является слабым препятствием для потока первичного излучения, падающего на дополнительный экран, то есть сигнал $U_{погл}$ оказывается по величине много меньше, чем $U_{расс}$. Общий сигнал имеет вид постоянной составляющей и дополнительной импульсной составляющей, совпадающей по знаку с сигналом фона от экрана (Рис.2) .

При прохождении в зоне облучения $U_{расс}$ объектна с высоким атомным номером, например, циркона, сигнал рассеянного излучения, совпадающий по знаку с сигналом фона от рассеяния на дополнительном экране, имеет малую величину вследствие того, что излучение, рассеянное облучаемой стороной объектна проходит через зерно компонента с высоким атомным номером и поглощается в самом зерне практически полностью. Одновременно, это же зерно с высоким атомным номером, проходя через пучок первичного излучения, ослабляет поток первичного излучения, падающий на дополнительный экран, на большую величину вследствие низкой прозрачности компонента с высоким атомным номером, то есть сигнал $U_{погл}$ по величине много больше, чем $U_{расс}$. Общий сигнал имеет вид постоянной составляющей и дополнительной импульсной составляющей, противоположной по знаку сигналу фона от экрана (рис.2).

Далее в блоке обработки сигнала выделяется только импульсная составляющая сигнала. Если принять полярность постоянной составляющей положительной, то зерна алмаза будут давать сигналы положительного знака, зерна сопутствующих компонентов с наиболее высоким атомным номером (например, циркон), будут давать сигналы отрицательной полярности, а зерна со средним атомным номером, наиболее близким к алмазу (например, кварц), вообще не будут давать сигналов и пройдут через зону анализа не изменяя уровень фона $U_{экр}$.

Толщина вспомогательного экрана, его материал и поверхностная плотность подбираются так, чтобы были равными нулю сигналы либо от зерен компонентов, наиболее близких по атомному номеру к алмазу, например, квар-

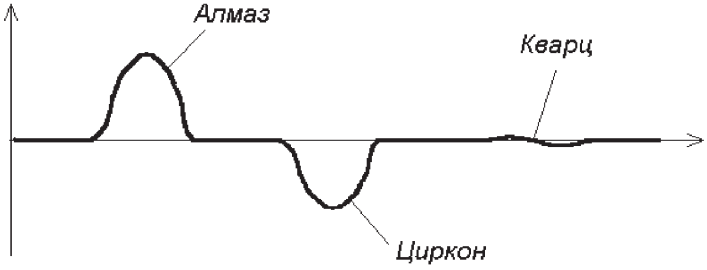


Рис.2. Формы сигналов для материалов с существенно различными атомными номерами.

цы, либо от зерен компонентов составляющих основную часть смеси компонентов, например, известняки.

Недостатком способа является низкая селективность разделения полезного и сопутствующих компонентов крупнокускового материала связанная с тем,что в моменты времени соответствующие входу и выходу куска сопутствующего компонента смеси в облучаемую область наблюдаются сигналы рассеяния от его нижней, а затем верхней открытых поверхностей, сравнимые с сигналами от куска полезного компонента. Данный недостаток приводит к тому, что исполнительный механизм системы отсекает в приемник не только полезный, но и сопутствующий компонент.

Для решения этой проблемы предлагается использовать двухдетекторный датчик рассеянного излучения (рис.3).

В данной схеме процессы, формирующие сигнал от объектов с малым и большим атомным номером, существенно различаются . По мере проникновения полезного компонента , имеющего малый атомный номер, в поток рентгеновского излучения увеличивается количество рассеивающих центров и увеличивается, следовательно, число квантов вторичного излучения, которые, вследствие высокой прозрачности алмаза в рентгеновском диапазоне, сначала почти беспрепятственно, а затем с небольшим ослаблением в теле объекта направляются в детектор. По этой же причине затенение рассеивающего экрана почти не увеличивается. В результате общий сигнал, содержащий постоянную (фоновую) и дополнительную импульсную составляющую, обладает полярностью, соответствующей увеличению излучения. Длительность импульса зависит от размера зерна и высоты потока рентгеновского излучения, заданной коллиматором.

Выход алмаза из зоны облучения сопровождается столь же монотонным спадом сигнала. Это наблюдается одновременно как в верхнем, так и в нижнем детекторах.

Сопутствующий объект, обладает большим, чем полезный объект коэффициентом фотоэлектрического поглощения, он сильнее затеняет рассеивающий экран, он сильнее поглощает собственное вторичное излучение.

Динамика прохождения куска сопутствующего минерала через плоский поток рентгеновского излучения характерна тремя ярко выраженными фазами

1. При входе в зону обнаружения крупного куска скользящее рассеяние излучения от его нижней поверхности беспрепятственно распространяется в направлении нижнего детектора. В результате в сигнале нижнего блока детектирования наблюдается сравнительно короткий импульс с полярностью, совпадающей с полярностью сигналов, наблюдаемых при прохождении полезного компонента (рис.4,а)

2. При нахождении куска в средней позиции, когда облучается только его средняя, затеняется значительная часть вспомогательного экрана, и, кроме того, возрастает путь вторичного излучения через кусок к детекторам. Этим почти полностью уравновешиваются сигналы, обусловленные процессами поглощения и рассеяния, с небольшим преобладанием первого. В результате этих двух процессов импульсные составляющие сигналов в каждом из детекторов будут иметь полярность противоположную той, что обнаруживается при прохождении полезного компонента и иметь

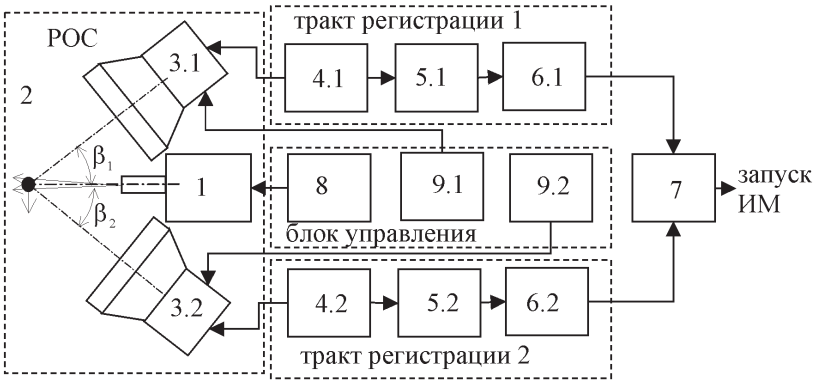


Рис. 3. Структурная схема системы обнаружения с двухдетекторной РОС. 1-источник рентгеновского излучения; 2-рассеивающий экран; 3.1, 3.2- сцинтилляционные блоки детектирования; 4.1, 4,2 –ПУ блоков детектирования; 5.1, 5.2-блоки обработки сигналов; 6.1, 6.2-блок предварительного разделения сигналов; 7- блок принятия решения.

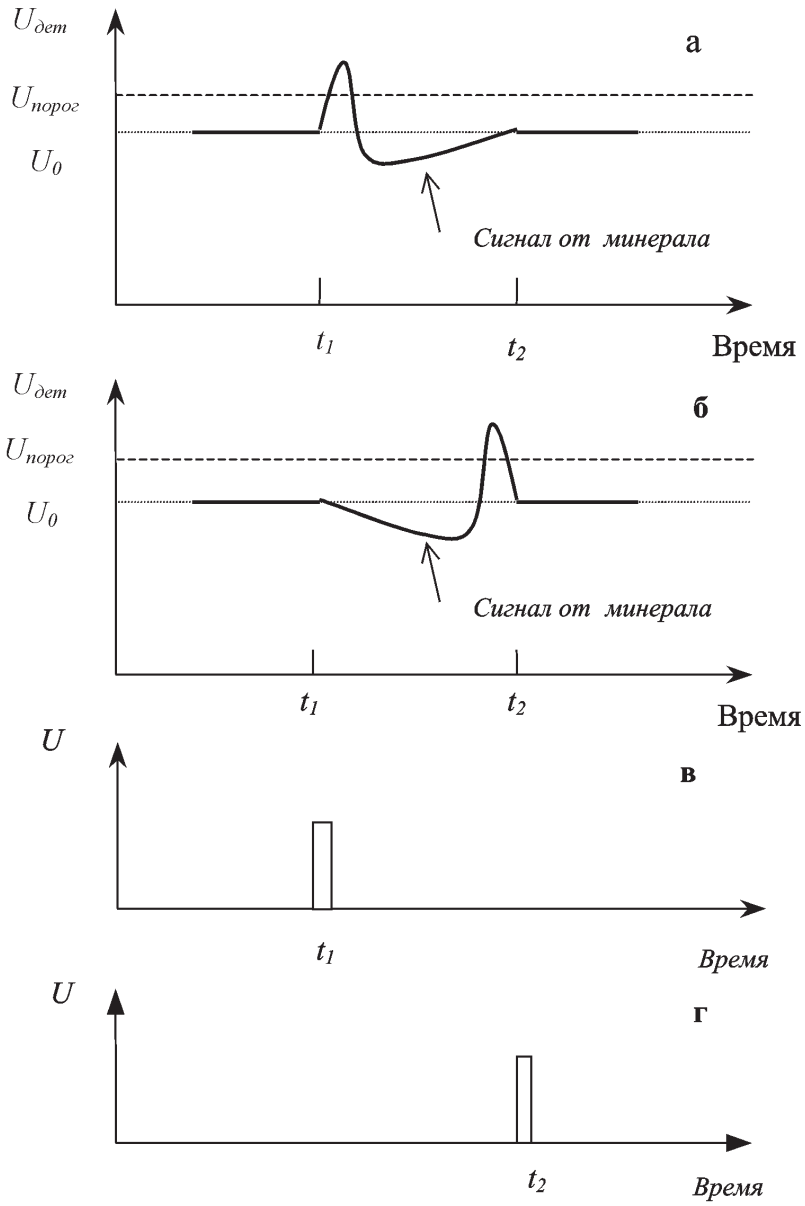


Рис.4 Сигналы блока регистрации при пролете объекта из сопутствующего вещества
а) – сигнал на выходе усилителя канала нижнего детектора;
б) - сигнал на выходе усилителя канала верхнего детектора;
в) - сигнал на выходе дискриминатора нижнего канала блока детектирования;
г) - сигнал на выходе дискриминатора нижнего канала блока детектирования.

амплитуду самих сигналов близкую к сигналам от рассеяния излучения вспомогательным экраном.

3. При выходе куска из зоны обнаружения идет такое же, как и в первой фазе, скользящее рассеяние излучения уже от его верхней поверхности в направлении верхнего детектора, что так же сопровождается увеличением сигнала. В результате в сигнале верхнего блока детектирования наблюдается сравнительно короткий импульс с полярностью, совпадающей с полярностью сигналов, наблюдаемых при прохождении полезного компонента (рис.4,б).

Только во второй фазе движения в оба детектора одновременно поступает верная информация о составе объекта. Сигналы, зарегистрированные на первой и второй фазах, разделены во времени и могут быть исключены применением схемы совпадений.

Для этого из сигналов, поступающих с верхнего и нижнего блоков детектирования выделяется импульсная составляющая сигналов, фильтруются шумы и производится срав-

нение с порогом разделения двумя независимыми дискриминаторами (рис. 4,в и г). Импульсы, снимаемые с выходов двух дискриминаторов, поступают на схему совпадений, то есть на логическую схему «И». На выходе схемы отсутствует импульсы не совпадающие во времени, то есть возникающие при входе сопутствующего минерала с поток приникающего излучения и при выходе из него, а присутствуют только импульсы, возникшие когда зерно полностью погружено в поток.

Измерение сигналов вторичного излучения одновременно двумя детекторами обеспечивает повышение селективности разделения. Прибор на основе двухдетекторного датчика успешно прошел испытания на алмазодобывающих предприятиях и начат его промышленный выпуск .

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Справочник по обогащению руд . Основные процессы. / Под ред. О.С .Богданова.-М: Недра, 1983.- 381 с.
2. Старчик Л. П. Ядерно-физические методы для рудоподготовки // Комплексная переработка минерального сырья. М.:Наука, 1992.- С. 130-136.
3. Таблицы и формулы рентгеноспектрального анализа. Методические указания/ Под ред. Н.И.Комяка. —Ленинград:ЛНПО «Буревестник»,1982,вып.3,101с.

Носков С.И.

УДК 115:37.01

ПОПЫТКА ПЕРВИЧНОГО ФОРМАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКЗАМЕНАЦИОННОЙ СЕССИИ

У специалиста, многие годы работающего в области анализа данных (иногда используют термин «прикладная статистика»), вид любой таблицы чисел, отражающих некоторый реальный процесс, вызывает некий «зуд» поисследовать ее формальными методами с целью выхода на какие-либо практически полезные рекомендации.

В виде такой таблицы могут быть представлены и результаты сессии. Посмотрим, какой их первичный упрощенный формальный анализ можно было бы провести?

Итак, пусть после первого этапа (до пересдач, что предполагает наличие у некоторых студентов двоек) сдачи сессии некоторым курсом стали известны значения величин x_i^j, $i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,m}$, где

i — номер студента,

j — номер сдаваемой дисциплины (или номер принимающего ее преподавателя);

n — число студентов на курсе;

m — число сдаваемых дисциплин (без зачетов!)

x_i^j - оценка, полученная i-ым студентом по j-ой дисциплине.

Проанализируем эти величины на предмет их взаимной согласованности. А именно, в какой мере оценки, выставляемые j-ым преподавателем, согласуются с оценками других преподавателей?

Сразу следует сделать одну важную оговорку. Безусловно, степень такой согласованности не должна никоим образом влиять на оценку профессионального уровня преподавателя, или, что уж совершенно недопустимо, отражаться на его внутреннем педагогическом статусе. Но известную полезную информацию, могущую повлиять на возможную корректировку преподавателем или манеры преподавания, или своей «сессионной тактики», или рабочей программы дисциплины, или еще чего-то профессионально важного, анализ такой согласованности способен дать. Этим те-

зисом хотелось бы ограничить философствование на данную непростую тему (преподаватель ведь может изначально сознательно настаивать на выведении себя из «зоны сравнения»), статья такую цель и не преследует. Целесообразнее перейти к формальному изложению предлагаемых сравнений.

Рассчитаем величину средней оценки каждого студента:

$$\overline{x_i} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{n} x_i^j,\ i=\overline{1,n}. \qquad (1)$$

Введем в рассмотрение простой коэффициент согласованности K^j для j-ой дисциплины (j-го преподавателя):

$$K^j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i^j - \overline{x_i}),\ j=\overline{1,m}. \qquad (2)$$

Содержательный смысл K^j состоит в следующем — он указывает на относительное отклонение оценок j-го преподавателя от средних оценок студентов курса.

Попробуем рассчитать возможные границы интервала, которому могут принадлежать значения K^j.

Возьмем крайний случай. Пусть для произвольного n $m=6$. Причем среди преподавателей есть один (с номером j) выраженный «ястреб», для которого $x_i^j = 2$ для всех $i=\overline{1,n}$. Пусть все остальные преподаватели — не менее выраженные «голуби», т.е. $x_i^k = 5$ для всех i и k≠j. Очевидно, что в соответствии с (1) в этом случае

$$\overline{x_i} = 4.5,\ i=\overline{1,n}.$$

Рассчитаем в соответствии с (2) значения K^p, $p = \overline{1,6}$. Будем иметь:

$$K^j = -2.5,\ K^k = 0.5,\ k \neq j.$$

Нетрудно убедиться в том, что если соотношение «ястребов» и «голубей» сменить на противоположное, то получим

$$\overline{x_i} = 2.5, i=\overline{1,n}, K^j = 2.5,\ K^k = -0.5.$$

Таким образом, в общем случае можно считать, что

$$K^j \in [-2.5, 2.5],\ \ j=\overline{1,m}.$$

Если $K^j = 0$, имеет место полная согласованность мнений j-го преподавателя со всей группой преподавателей. Чем меньше значение $K^j < 0$, тем в большей степени преподаватель проявляет жесткость, чем больше $K^j > 0$ — соответственно, мягкость. Но только по отношению к средним оценкам!

Повторим, это не хорошо и не плохо. Это просто информативно. Понятно, что если квалификация всех m преподавателей высока, «идеальным» значением K^j будет ноль.

Перед тем, как ввести в рассмотрение еще один коэффициент - назовем его условно по аналогии с [1] коэффициентом знаковой согласованности, - построим простой пример.

Пусть $\overline{x_p} = 4.2$, $\overline{x_s} = 3.9$, $x_p^j = 5.0$, $x_s^k = 5.0$, $x_p^k = 3.0$, $x_s^j = 4.0$

Отсюда видно, что средняя оценка p-го студента выше, чем s-го. Но, если у j-го преподавателя оценка p-го студента также выше, чем у s-го, то у k-го преподавателя — ниже. То есть в последнем случае имеет место рассогласование знаков приращений средних оценок двух студентов и оценок у них k-го преподавателя. Окончательно, для пары студентов s и p у j-го преподавателя оценки знаково согласованы, а у k-го — нет.

Формально коэффициент знаковой согласованности R^j (по отношению ко всем возможным n(n-1) парным сравнениям) представим в виде:

$$R^j = \frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\sum_{l>i} sign\left[(\overline{x_i} - \overline{x_l})(x_i^j - x_l^j)\right],\ \ j=\overline{1,m}.$$

Напомним, что операция *sign(b)* (знак числа b) задается по правилу

$$sign(b) = \begin{cases} 1, & b>0, \\ -1, & b<0, \\ 0, & b=0. \end{cases}$$

Легко видеть, что R^j меняется в пределах от -1 до 1. При этом значение $R^j = 1$ указывает на полную знаковую согласованность оценок j-го преподавателя со средними оценками других преподавателей, $R^j = -1$, напротив, на их полную рассогласованность.

Оценки K^j и R^j (а, следовательно, и соответствующие качества преподавателей) легко можно проверить на стабильность, сравнив их значения на разных курсах, в разные сессии, за разные годы и т.д.

«Потребителями» информации о значениях указанных коэффициентов для преподавателей могут быть как они сами, так и деканаты, кафедры, учебный отдел и другие структурные подразделения вуза.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Носков С.И. Построение эконометрических зависимостей с учетом критерия «согласованность поведения» // Кибернетика и системный анализ.-1994.-№1, С.177-180.

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

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

Раздел 3.

Экономические инновации. Социально-экономические исследования.

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

Khomenko A.P., Solskaya I.Y.

УДК 681.3

THE PROJECT APPROACH TO PREPARATION OF TRANSPORT ENGINEERS

Limited manpower resources and project model applied to the solution of major technical problems characterize transport development in Russia[1].

The project approach serves as a basis for Educational programs in Irkutsk State Railroad university.

Engineers preparation for realization of mega-projects has its peculiarity: skills required for a concrete project can be received only in practice, during realization such a project. In this case experience is gained usually by trial-and-error method, as a project is designed by some certain experts and organizations, but it is realized by the others.

Only a university possessing significant scientific-methodological resources, an opportunity and the right to educate and retrain experts of different levels can ensure a high level of project attainments. Maintenance of a flexible educational and professional trajectory requires tools for estimation of motivation, preparation quality and students' and experts' ability to work in a team. It also needs a developed system of pedagogical methods as an indispensable tool for formation of corporate culture.

The purpose of this innovative educational project is development and a wide application of preparation system for creative innovative expert groups (CIEG), which will realize innovative megaprojects.

The main result of the project realization for transport should be creation of conditions for formation of effective creative engineers' collectives, which would be capable to realize infrastructural mega projects.

The major results of the project realization for region should be improvement of manpower quality and also creation of conditions for formation of flexible professional trajectories of engineers.

The main tools for realization of project engineers' preparation are:

- formation of innovative-educational model of high school (creation of territorially distributed educational-scientific environment, which would promote a reasoned formation of flexible educational and professional trajectory; and also conditions, methods and tools of its realization);
- formation of synergistic result channels in effective cooperation of potentially united personal and educational resources for active application of innovations in education;
- application of cluster methodology for formation of creative innovative expert groups (CIEG).

The program is based on following ideas:

- Formation and application of a mechanism for estimation and monitoring of transport needs by qualified experts and expert groups;
- Creation of conditions and realization tools for a flexible educational and professional trajectory based on estimation of personal qualities and motivations of concrete educational consumers;
- Association to creative innovative expert groups (CIEG) during education will raise quality of experts and their relevance to development and realization of innovative projects;
- Determination and application of uniform ideology for creation and functioning of total quality management (TQM);
- Formation of a flexible educational and professional trajectory at all stages of CIEG functioning is provided by territorially distributed system of continual education and professional training;
- The cluster approach to formation of CIEG allows defining unique professional structures of these groups, depending on specificity of the project and resources involved in its realization;
- Qualitative estimation of manpower as an efficiency parameter of educational activity.

The basic potential which allowed formulating referred above ideas:

1. Creation of a developed innovative educational infrastructure.

2. Close connections between transport agencies and branch and federal authorities, developed during realization of educational, scientific and technical programs.

3. Wide contractual relations to leading transport agencies (on preparation of experts and professional training).

4. System of continual pre-high-school education.

5. Experience in development and application of new training forms and technologies: rating system, remote leaning educational technologies, the center of personnel monitoring, service yard, the engineering center, educational experimental field, a student's business centre, the innovations and business-education center, system of correspondence examinations and conferences of lyceum students.

6. The developed system of pedagogical activities.

7. A significant volume of the researches and development (R&D) which are carried out at university with participation of students and post-graduate students (128.000 rubles per a lecturer); a developed structure of scientific laboratories, educational- scientific centers, students' scientific organizations.

8. Availability of a developed corporate computer network, 67 display rooms, 4 outputs into external networks (Internet\nets); 0,7 computer per 1 student and the annual external traffic of 1700 Gbytes.

9. International contacts of Irkutsk State Railroad university to foreign educational and scientific institutes and to the innovative enterprises of the Great Britain, Germany, China, Korea; experience of educational and scientific project realization.

10. Application of a quality management system to the educational and scientific activities at the university.

The realization of some innovative projects has already begun at the first stage of innovative educational program in the context of the CIEG approach to scientifically-educational activity.

A special significance for the human capital improvement gets realization of the employment mechanism at an enterprise. The enterprises carry out preparation and retraining of workers under the contract, both in intrafirm system of vocational training and in specialized educational establishments, with which they conclude long-term contracts. Creative innovative groups of experts (CIEG) are considered to be the innovative mechanism of employment, they enable solving a lot of global problems connected with an engineering staff deficiency, because such groups take over the solution of current problems.

In this connection HIGH SCHOOL can be considered as a technological educational complex, which unites all of specialties and allows the most effective forming of creative innovative groups of experts (CIEG).

The monitoring system is an important component of CIEG formation technology.

The monitoring system objects for CIEG participants (including procedures of testing and rating) during the project realization are:

- Optimization of flexible (educational, professional) trajectories in consideration of individual psychological features of students and experts;
- Filling up transport staff vacancies with graduates;
- Studying adaptation of students to training in CIEG; as well as graduates' adaptation to the work on projects at enterprises and their adaptation to project requirements.

The system of monitoring includes:

A) The entrance control:

- Vocational guidance among schoolboys and youth;
- Estimation of motivation;
- Estimation of a preparation (schooling) level.

B) The internal control

- Estimation of training success
- Psychological estimation
- Estimation of students at the enterprise on results of a practical training;
- Estimation of the enterprise by CIEG participants as well as estimation of project realization by high school and by enterprise;

C) The outgoing inspection:

- Estimation of young experts by the project director (annually within 3 years after graduation);
- Estimation of young experts' contentment with the career

development within the limits of the project.

Psychological component of educational process within the limits of CIEG methodology includes:

1. career-guidance;
2. professional psychological selection;
3. psychological support.

Results of the preliminary analysis of students' estimation are presented in tables 1, 2. According to a score, there are four groups of professional standard estimation of CIEG participants in the table 3.

The estimation was made on a 7- point scale, where 7 points - the most positive estimation, 1 point - the most negative estimation.

Table 1.

Estimation of vocational training (in points).

	Estimated qualities	Average points
1	Deep and thorough professional knowledge	5,2
2	Ability to apply professional knowledge for the decision of a professional problem	5,15
3	Knowledge of the normative documents regulating realization of the project, the rights and duties in CIEG	5,1

Table 2.

The structure of estimations.

	Estimated qualities	Estimations (points)						
	Deep and thorough professional knowledge		7	8	7			
	Ability to apply professional knowledge for the decision of a professional problem		5	6	2			
	Knowledge of the normative documents regulating realization of the project, the rights and duties in CIEG		1	2	2			

Table 3.

Groups of professional standard estimation of CIEG participants.

	Estimated qualities	Preparation levels			
		High preparation level (7,6 points)	Sufficient preparation level (5 points)	Insufficient preparation level (3,2,1 points)	Level is not determined 4 points)
	Deep and thorough professional knowledge	41	38	4	17
	Ability to apply professional knowledge for the decision of a professional problem	39	36	3	22
	Knowledge of the normative documents regulating realization of the project, the rights and duties in CIEG	34	42	2	22

The structure of estimations on these parameters, is presented in the table 2.

The documentation for the estimation of everyone's contribution on CIEG work, and also for the estimation of a student's satisfaction with the project work has been elaborated, prepared and approved in Irkutsk State Railroad university. The presented results show the necessity to make psychological achievements in production control and in personnel management to the key points in professional skill improvement at enterprises.

Participants of realization of innovative educational program.

Regional branch university complex Irkutsk State Railroad university participates in the innovative educational program. Within the limits of the university, there are interaction, interosculation and mutual aid among the head university, its branches, public authorities, railway enterprises, other spheres of business (I mean state enterprises and private companies).

The educational - scientific - innovative complex includes six large components:

1) Innovative infrastructure;

2) Educational component;

3) Scientific component;

4) Industrial and academic scientific institutions and the high schools subordinated to Federal Agency of railway transportation;

5) Railway enterprises;

6) The enterprises and the territories, which realize large-scaled innovative projects.

The basic innovative components can be designated as follows:

1. An innovative infrastructure.

1.1. Guidance of the university.

1.2. A student's business centre (SBC).

The purpose of its creation is the effectiveness increase of practical training in CIEG. A Student's Business Centre is an innovative structure in Irkutsk State Railroad university created for students' training with the use of exclusive educational technologies in creative innovative activity. Basic SBC components are:

- Equipped workplaces meeting requirements of scientific and technical guidelines of high school.

- Functional services, which work in close contact with university departments:

a. educational-scientific training ground

b.the information-methodolo-gical department working as a consulting centre where students can receive the necessary information on the patent legislation concerning the estimation and protection of intellectual property;

c. the educational-methodical department within the limits of the university guidance, which will coordinate questions concerning inclusion of innovative projects into curricula, and will also organize the educational process for CIEG participants in the field of projects management, including regular master-classes;

d. a conference hall.

- Information Service department providing access to world storehouses of knowledge and information.

- General Service department providing trouble-free functioning of the university premises and equipment.

1.3. Sociological-psychological service of Irkutsk State Railroad university - the Center of the estimation and monitoring of the personnel (CEMP).

Its main guidelines are:

1. Monitoring of the influence of social resources (human factor) on results of enterprises' work.

2. Quality management of education: psychological maintenance of educational and pedagogical process.

3. Psychological maintenance of professional experts' work in the enterprises (organizations)

4. Psychological personnel training and teaching psychological techniques for professional development.

5. The organization and carrying out of research-and-production conferences "Applied psychology for professional activities and education».

1.4. The engineering center.

Its main guidelines are:

- Practical realization of scientific and applied results of researches within the limits of innovative projects

- Accomplishing the tasks of transference of projects and technologies, telecommunications, etc. in interests of transport enterprises;

- Interaction with innovative-technological organizations - educational-scientific training grounds of Irkutsk State Railroad university - for formation of unifornrumified engineering space for implementation\introduction of research results

1.5. The center of innovations and business-education carries out the basic activity on formation and quality management of innovative research-educational process.

Prospective results on development of the university's infrastructure.

Development of an infrastructure will allow creating a nourishing scientific environment. It will not only enable a successful solving of the university's research problems, but will also help colleagues, including teachers of the university branches, in solving their tasks (fig. 1).

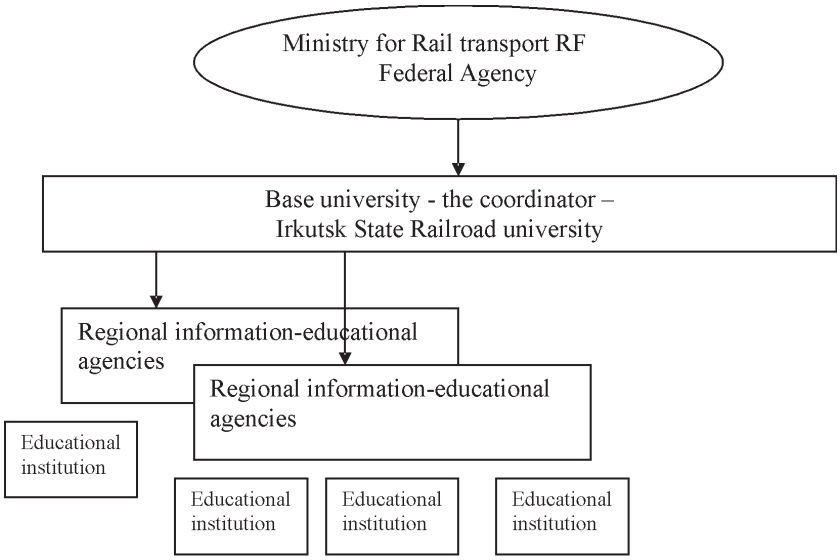


Fig. 1. Regional structure of Irkutsk State Railroad university Base university - the coordinator Educational institution: high schools, colleges.

Classical methods of creation of such environment are scientific-practical forums/ conferences and their proceedings. But these classical methods are at present rather a declaration of priority, than a scientific environment for problem solving and solution searching. There will be organized a constantly working scientifically-practical Internet-forum, which will be accessible to candidates of science, Doctors of Science, for post-graduate students and students within the limits of high school.

Tasks of such forum should be:

1. Publication and discussion of research articles which are published (scheduled) in collected articles;
2. Giving an account of current tasks and bringing up unsolved problems for discussion;
3. Discussion on methodology of research tasks solution;
4. Open-minded consultation, a concerned dialogue, offering information about problems under consideration;
5. Selection of problems which could be solved by students and postgraduate students within the limits of their course, degree or candidate works.

The innovative program has a great value for Irkutsk State Railroad university, for the Railroad branch, the region, and the system of higher education. This program influences the priority problems of Russian economy (by the strategic purposes definition, by the choice and a substantiation of many problems and forms of their realization).

The transport branch has been chosen as a base, because it is the most dynamic economy branch, forming its infrastructural component. A continuity of full life cycle of educational activity is provided at realization of new educational technologies. The structure of resource maintenance of the program realization includes all technological components of educational activity: material resources, teachers and students, educational literature, educational technologies.

For an objective estimation of the program efficiency there is a system of control parameters, describing influence of the basic results on development of transport branch, where the great bulk of our Railroad University graduates work.

REFERENCES

1. Homenko A. P., Solskaya I. Y. Specificity of business competence formation in engineer education. 35th International IGIP Symposium in cooperation with IEEE / ASEE / SEFI, 2006-09-18, Tallinn, Estonia
2. Solskaja I.JU. Theory of reforming economic systems and internal homeostat // Modern technologies. The system analysis. Modelling. Scientific magazine. 2004. № 2. P. 126-132.

Толстых О.Д., Гозбенко В.Е.

УДК 681,3:[001 +62+33]

УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Высшее назначение математики в том, чтобы находить скрытый порядок в хаосе, который нас окружает.

Н. Винер.

Современное развитие техники и организации производства требует от инженера логической полноты суждений, дисциплины мышления, способности быстро обучатся новому, хорошо ориентироваться в новых технологиях, умения перестраивать свою работу в соответствии с требованиями жизни. При этом от инженера требуется не трафаретное и формальное использование известных фактов, методов, но глубокий и всесторонний анализ возникающих проблем. Развитию всех этих качеств способствует, прежде всего, математика. Роль математики в системе всего естествознания трудно переоценить. Сейчас практически нет ни одной отрасли знаний, которая в той или иной степени не использовала бы математику. И причина этого, как проверено опытом тысячелетий, то, что математика -исключительно эффективное средство исследования в любой науке. Математика учит учиться, упорядочивает знания, совершенствует общую культуру мышления, развивает умение логически рассуждать, воспитывает точность и обстоятельность аргументации, учит абстрактно мыслить. Абстракции вызываются потребностью практики. Однако наш ум может создавать математические модели, не вполне адекватные исследуемому явлению. Инженер должен помнить об этом и проверять практикой полезность и точность абстракций. Таким образом, хорошее овладение основами высшей математики, понимание возможностей математики применительно к своей специальности и умелое использование математического аппарата необходимо для становления современного инженера.

Вузовский курс высшей математики не может объять необъятное и охватить все разделы математики, которые могут потребоваться инженеру. Кроме того, постоянное развитие математики будет ставить инженера перед необходимостью совершенствования и обновления математических знаний. Культура мышления предполагает умение работать с литературой. В современных условиях возрастают требования к качеству подготовки специалистов. Недостаточно высокий уровень математический подготовки выпускников средних школ ставит вузовских преподавателей перед необходимостью выявления и устранения в процессе обучения в вузе пробелов среднего образования. Однако времени в учебных планах для этого не предусматривается. К тому же сокращение за последние годы количества часов аудиторных занятий при практически неизменном объеме курса высшей математики вызывает новые трудности в овладении математическим аппаратом. В связи с этим проблема оказывается не столько в том, чтобы дать «больше математики», сколько в том, чтобы лучше, рельефнее выделить возможности ее применения и при этом не низводить математику до уровня простого придатка специальных дисциплин. При решении указанных проблем ключевое значение имеет умение преподавателя рационально и логически обоснованно построить курс с целью наиболее эффективного использования аудиторного времени, а также эффективная организация и контроль самостоятельной работы студентов. Повышение эффективности самостоятельной работы - одна из актуальнейших проблем высшей школы.

Изучение высшей математики (как и любой другой дисциплины) предполагает активную систематическую работу студентов над учебным материалом, постоянный самоконтроль, выработку умения ценить время свое и преподавателя, делать все хорошо и, по возможности, быстро. Цель - приобретение прочных и, главное, осознанных знаний, что не всегда просто для начинающих в силу тонких логических и часто абстрактных рассуждений. Тем не менее, эта цель может быть достигнута в результате слаженной работы преподавателя и студента: с одной стороны - работа под руководством преподавателя на лекциях и практических занятиях, с другой стороны - самостоятельная работа студентов дома, в библиотеке, в читальном зале. Ведущая роль в этом принадлежит лекциям. На лекциях рассматриваются фундаментальные вопросы, которые иллюстрируются примерами, графиками, схемами, таблицами.

Важно, прежде всего, вызвать интерес к изучению математики, раскрывая возможности ее применения, логические связи между изучаемыми разделами высшей математики, а также межпредметные связи. Повышению интереса к математике способствуют упоминания об истории возникновения и развития рассматриваемых понятий, фактов, разделов, а также исторические экскурсы о вкладе разных ученых, в том числе, русских, советских, российских. От лектора зависит сделать лекцию живой, интересной, логически обоснованной и доступной для слушателей. От лектора требуется умение отказаться от громоздких формул, доказательств, если на то нет особой надобности. Некоторые аспекты изложения курса высшей математики были освещены автором ранее в работе [3].

Обязанность лектора помогать студентам развивать самостоятельность, инициативу, стимулировать активную работу и творческие изыски. С этой целью желательно чаще давать упражнения, можно выносить некоторые вопросы на обязательную самостоятельную работу всем студентам. В рамках НИРС наиболее подготовленным студентам можно предложить интересные прикладные вопросы с заслушиванием докладов на лекционных или практических занятиях.

Приобретенные на лекциях и практических занятиях знания студенту важно закрепить рационально организованной самостоятельной работой. Задача преподавателя - подготовить комплекс индивидуальных домашних и аудиторных заданий на отработку изучаемых понятий, разделов и их применения. Смотреть, как кто-то решает, можно до бесконечности. Студенту важно пробовать свои силы в решении математических задач. Только тогда он сможет глубже осознать изучаемый материал, когда будет работать над своим заданием.

Авторы в течение ряда лет практикуют выдачу индивидуального варианта практически по каждому изучаемому разделу. Выдача индивидуального задания предполагает его защиту студентом. На самостоятельных работах, так же, как и на экзамене, допустимо использование справочника, подготовленного самим студентом.

Решающую роль в подготовке специалистов играют хорошие учебно-методические пособия. Материал в учебниках не всегда доступен, часто перегружен громоздкими доказательствами и рассуждениями. Опыт чтения лекций и работы на практических занятиях помогает создать комплекс таких разработок, содержащих краткий справочный материал, образец выполнения индивидуального задания, варианты контрольных заданий (что важно, в особенности, для студентов заочной формы обучения), а также комплекс пособий, содержащий расширенный конспект лекций по спецглавам высшей математики, который можно использовать также для НИРС. Использование такого комплекса позволяет преподавателю наиболее рационально использовать аудиторное время и активизировать самостоятельную работу студентов.

Однако никакие методические пособия не могут заменить самостоятельной работы студента, которая начинается, прежде всего, с обработки конспекта лекций. При подготовке к практическим занятиям или при выполнении индивидуального задания студент должен придать рельефность, объемность своему конспекту: выделить (желательно разноцветной пастой) названия разделов, тем, параграфов, а также формулы, новые понятия, обозначения теоремы. На полях можно делать пометки о доказательствах, непонятых вопросах; оценить важность какого-либо факта, провести аналогии и логические связи с изученными ранее темами, с материалом других дисциплин; сравнить изложение материала в лекциях и учебниках.

Студенту важно научиться выделять главное в лекции, то, что необходимо записать. Математику нельзя читать как художественную литературу; важно работать над конспектом с карандашом в руке, восстанавливая доказат-

ельства, предложенные на самостоятельную работу, воспроизводя необходимые математические выкладки и вычисления. Все это позволяет студенту прочувствовать и ярче запечатлеть в памяти изучаемый материал.

Самостоятельную работу студентов необходимо стимулировать; например, возможно выставление зачета по хорошей текущей успеваемости, можно освободить от практической части на экзамене студента, выполнившего и защитившего все индивидуальные задания на отлично, провести досрочный прием экзамена у студентов, успевающих на практических занятиях или выполняющих тестовые задания на хорошо и отлично. С наиболее одаренными студентами можно заниматься по индивидуальному плану, предлагая им более углубленное изучение курса высшей математики и задачи, требующие нестандартного подхода к их решению.

Самостоятельную работу студентов можно и нужно контролировать. Ничто не заменит живого общения студента и преподавателя. Для контроля качества самостоятельной работы можно использовать теоретические опросы, коллоквиумы, контрольные и индивидуальные задания, проведение тестирования.

Индивидуальные работы студентов важно проверять как можно быстрее, по крайней мере, в течение недели со дня сдачи. При этом важна обратная связь. Студенту необходимо по получении проверенного задания выполнить работу над ошибками, устранить указанные преподавателем пробелы в знаниях по изучаемому разделу, защитить свою работу.

Таким образом, рациональное построение лекционного курса, а также эффективная организация и контроль самостоятельной работы позволит студенту получить достаточно хорошие и прочные знания по математическим дисциплинам, а также приобрести необходимые инженеру навыки применения математического аппарата и вычислительной работы.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Патрикеев О.В. Повышение эффективности самостоятельной работы курсантов // Опыт работы преподавателей училища. Иркутск: ИВВАИУ, 1996, С. 82-85.
2. Бахтин А.В., Целищев В.А. К вопросу организации самостоятельной работы курсантов под руководством преподавателя // Опыт работы преподавателей училища. Иркутск: ИВВАИУ, 1996, С. 85-89.
3. Толстых О.Д. О новых учебных планах и некоторых аспектах изложения курса высшей математики в техническом вузе // Опыт работы преподавателей училища. Иркутск: ИВВАИУ, 1996, С. 8-11.

Степин А.Г.

УДК 656

ИСТОРИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ В РАЙОНЕ СЕВЕРО-МУЙСКОГО ТОННЕЛЯ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Северо-Муйский железнодорожный тоннель (СМТ), протяженностью 15.34 км, построен в Муйском районе Республики Бурятия под осевой частью Северо-Муйского хребта, являющегося водоразделом двух крупных акваториальных бассейнов: Байкальского и Витимского.

Тоннель построен в однопутном исполнении, двускатный с уклонами на северо-запад (5.03км. по Аз.310°) и юго-восток (10.31км. по Аз.130°) и предназначен для обеспечения круглогодичного грузопассажирского движения по Байкало-Амурскоймагистрали (БАМ) Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД).

Существенный вклад в изучение структуры района строительства СМТ вложил Институт земной коры СО АН СССР. Данные региональных исследований ИЗК опубликованы в

восьмитомной монографии «Геология и сейсмичность зоны БАМ».

Геокриологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия района в целом начали изучаться в основном в связи с сооружением СМТ. Основной объем работ в этих направлениях по Бурятскому участку БАМа выполнил проектно-изыскательский институт «Сибгипротранс» в тесном содружестве и по договоренности с подразделениями ПГО «Бурятгеология».

В дальнейшем инженерно-геологическими, гидрогеологическими исследованиями в пределах строительства СМТ и сопровождающих его выработок занимались многие организации. Наибольший объем работ был выполнен подразделениями ПГО «Бурятгеология». Вдоль оси тоннеля были выполнены буровые разведочные работы, в результате которых была подтверждена сложная геолого-структурная обстановка по трассе тоннеля.

Одновременно с оценкой условий строительства тоннеля проводилась разведка подземных вод, для целей водоснабжения поселков строителей и технологических сооружений, а также регулярные наблюдения за режимом подземных вод и экзогенными процессами.

Начиная с 1985 г. проблемами гидрогеологии и инженерной геологии на СМТ занимается Северо-Муйская опытно-методическая партия Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) в тесном содружестве и по договору с ПГО «Бурятгеология».

Таким образом, район в целом и участок строительства СМТ были детально изучены в геологическом отношении многими независимыми научными и производственными организациями, при использовании всевозможных методов исследований земных недр и поверхности. Однако, при проектировании перед началом строительства тоннеля и вспомогательных выработок, а также в процессе их проходки, проектными организациями (Сибгипротранс, Ленметрогипротранс, Бамтоннельпроект), а также, самими строителями, многие инженерно-геологические и гидрогеологические факторы не были учтены, что значительно осложнило строительство Северо-Муйского тоннеля.

Комплекс инженерно-геологического обслуживания в период строительства СМТ производился геологическими службами тоннельных отрядов. Основным руководящим документом геологической службы был ВСН 190-78 [1]. При ведении исполнительной инженерно-геологической документации (ИИГД) зарисовка и описание забоев выработок производилось через 5-6м, а в зонах повышенной опасности – 1-2м. Опережающее разведочное бурение, проходка вспомогательных выработок и другие наблюдения позволяли прогнозировать горно-геологические условия на трассе основного тоннеля. Обо всех ожидаемых осложнениях немедленно сообщалось руководителям отрядов, участков, делались предупреждающие записи в горный (и др.) журнал, предпринимались другие меры безопасного ведения работ.

По ходу проходки выработок СМТ геологами Управления строительством Бамтоннельстрой (УС БТС) и других организаций методично велся отбор проб горных пород и воды для различных видов анализов. Опробование осуществлялось также и при ведении поверхностных видов исследований: геологическая, гидрогеологическая съемки, бурение разведочных, гидрогеологических, водопонизительных скважин и др.

Аналитические работы (физико-механический, химический, спектральный, минералогический, петрографический анализы горных пород, химический, газовый, эманационный анализы подземных и поверхностных вод) выполнялись в соответствующих лабораториях организаций, проводивших исследования.

Геологическая служба при выполнении исследований перед началом строительства, а также в его процессе четко и своевременно выполняла свои функции. Однако в процессе строительства отдельными руководителями принимались решения и отдавались распоряжения, идущие в разрез (или прямо противоположные) с проектами и технологией производства. Проектировщики, при составлении проектов производства работ (ППР) зачастую игнорировали данные разведочного бурения и предупреждения геологов. Последствия приводили к внезапным выбросам в выработки больших объемов водно-грунтовых масс, гибели людей, остановки строительства тоннеля на длительные периоды с целью ликвидации последствий аварий и изменения технологии производства работ.

В настоящее время тоннель построен и эксплуатируется в течение нескольких лет. В наследство эксплуатационникам досталась

масса дефектов и недоделок (таблица 1). Прежде всего, это - водопроявления в тоннеле и вспомогательных выработках, а именно: сосредоточенные течи через обделку выработок дебитом до десятков $м^3$ /час, течи по многочисленным трещинам в постоянной обделке тоннеля, капеж на контактную сеть. В обделке основного тоннеля наблюдается множество трещин, как обводненных, так и сухих с различной величиной раскрытия. Существенными повреждениями в тоннеле проявились в период эксплуатации отрясенные шпалы и блоки путевого бетона. В настоящее время назрела еще одна проблема, которую придется решать тоннельщикам в недалеком будущем — это процесс интенсивного выщелачивания бетона обделки тоннеля, а также коррозия открытых металлических конструкций.

Автор много лет работал в геологической Службе Бамтоннельстроя в период строительства, в Тоннелеобследовательской станции — в период эксплуатации, знаком с большинством материалов инженерно-геологических исследований, анализ которых приводится ниже.

Гидрогеохимическая характеристика подземных вод. Общий геохимический облик подземных вод является в целом однотипным. Это - ультрапресные (до 0,05 г/л) и пресные(до 0,33 г/л), гидрокарбонатные нейтральные или

Табл. 1

Перечень дефектов в СМТ и методы их устранения.

№	Наименование дефектов	Методы устранения
1	Капеж со свода на контактную сеть	Установка экранов. Установка пакеров. Отведение воды шлангами, трубами. Бурение дополнительных дренажных скважин для осушения тоннеля.
2	Сосредоточенные течи через обделку	Установка экранов. Установка пакеров. Отведение воды шлангами, трубами. Бурение, шпуров и нагнетание водоподавляющих растворов. Бурение дополнительных дренажных скважин.
3	Течи по деформационным и холодным швам и трещинам.	Установка экранов на швы. Бурение шпуров вдоль трещин и нагнетание растворов.
4	Сухие раскрытые трещины	Контроль раскрытия трещин с помощью маяков. Бурение шпуров вдоль трещин и нагнетание растворов.
5	Отрясенные шпалы	Восстановление проектной связи путем нагнетание лечебных растворов.
6	Отрясенные блоки путевого бетона. Причины: 1.Сложные инженерно-геологические условия участка. 2. Возможные частые сейсмо-тектонические подвижки. 3. Нарушение технологии укладки бетона при сооружении основания и пути в тоннеле.	Подъем блоков до проектного уровня. Надежная гидроизоляция водосборных лотков. Бурение скважин с нагнетанием быстросхватывающих прочных растворов.
7	Выщелачивание бетона обделки тоннеля и других выработок. Коррозия металлических конструкций.	Осушение тоннеля. Бурение дополнительных дренажных скважин. Бурение шпуров, нагнетание быстросхватывающих растворов. Покраска открытых металлических деталей.
8	Морозное воздействие на обделку и ВСП. Наледи, сосульки.	Регулировка тепло- вентиляционного режима в холодный период года.

слабощелочные воды, которые по химическому составу, в основном, соответствуют гидрологическому типу круговорота инфильтрационного генетического цикла. Вместе с тем, они обладают характерными особенностями, определяющимися в первую очередь геолого-структурными условиями.

Холодные пластово-поровые воды рыхлых четвертичных отложений - **Зона аэрации** Муяканской впадины, аллювиальных и озёрно-аллювиальных отложений Ангараканской впадины имеют кальциево-натриевый и натриево-кальциевый состав при минерализации 50-80 мг/л. Холодные трещинные и трещинно-жильные воды гранитов **- Зона насыщения –** имеют гидрокарбонатный, иногда, сульфатно-гидрокарбонатный и хлоридно-гидрокарбонатный анионный и натриевый или кальциево-натриевый катионный состав. Содержание окиси кремния в них достигает 25 г/л при минерализации до 100 мг/л. Содержание фтора, чаще всего, составляет 1-2 мг/л. Воды, как правило, слабощелочные.

Термальные трещинно-жильные воды щелочные, азотные с минерализацией от 100 до 330 мг/л. Анионный состав гидрокарбонатный, причём в водах Итыкитского термального проявления содержание сульфат-ионов выше, чем в водах Окусиканского очага разгрузки. Катионы, в основном, представлены натрием. Термальные воды характеризуются высокими содержаниями окиси кремния, фтора и гелия. При этом, содержание фтора прямо пропорционально температуре воды во всём установленном диапазоне её изменений и определяется подтоком глубинных термальных вод. Результаты определения изотопов кислорода и трития свидетельствуют об инфильтрационном происхождении подземных вод, вскрытых СМТ. Определение изотопного состава урана в подземных и поверхностных водах СМТ, проведённые ВСЕГИНГЕО совместно с Институтом физики АН Киргизской ССР, позволяют сделать следующие выводы:

-доля инфильтрационных вод в общем балансе формирования вод от притоков в СМТ превышает 70%;

-на участках значительной сработки запасов подземных вод (Восточный блок) доля вод глубокой циркуляции в формировании водопритоков в выработки достигает 60-90%.

Результаты химического анализа проб воды, выполненных Северо-Муйской партией Северо-Байкальской экспедиции, приведены в Таблице 2.

По содержанию микрокомпонентов в подземных водах достаточно чётко можно выделить очаги разгрузки термальных вод (Западный участок: ПК 59+48; Восточный участок: ПК 84+77), для которых характерны повышенные содержания в воде молибдена, вольфрама, ванадия, никеля, германия и галлия.

В пределах этих интервалов отмечены также локальные высоко контрастные аномалии серебра (до 0,4 мкг/л при фоновом содержании 0,02 мкг/л). Такие же аномалии отмечены на западном участке в интервале ПК 36+00÷34+00, ПК 30+00, ПК 28+00 ÷ 27+00 , тяготеющие к мощным разломам, ограничивающим тектонические блоки IV порядка.

На восточном участке СМТ аналогичная точечная аномалия приурочена к подземным водам с температурой +44°С. К III тектонической зоне(ПК 38+00 ÷ 45+80) приурочена аномалия содержания ванадия (8-10 мкг/л).

Повышенное содержание цинка отмечено на западном участке СМТ в интервале ПК 54+00 ÷ 19+00, которое превысило фоновое значение, и в отдельных случаях достигало 100 мкг/л. Аналогичная ситуация отмечена на восточном участке в интервале ПК 61+00 ÷ 43+00.

Табл. 2

Содержание в грунтовых водах микрокомпонентов.

Микрокомпоненты	Фоновое содержание в воде на поверхности, мкг/л	Фоновое содержание в воде на горизонте СМТ, мкг/л
Никель	0,5	4
Цинк	10	7
Медь	2	3,2
Молибден	0,5	0,6
Ванадий	0,5	-
Серебро	0,01	0,02

Данные опробования подземных вод в процессе проходки тоннеля хорошо коррелируются с площадными аномалиями содержаний микрокомпонентов в створе СМТ, выявленных при гидрогеологической съёмке масштаба 1: 50000. Вместе с тем, фоновые значения концентраций микрокомпонентов, полученные на горизонте СМТ, как правило, заметно выше определённых при площадном опробовании (табл. №2).

Необходимо отметить, что при проходке выработок СМТ, на составе природных вод заметно отражалось техногенное вмешательство, прежде всего, работы по химическому закреплению грунтов. В зонах цементации разломов воды становились резкощелочными (pH >9), содержащими в составе анионы OH^- и CO^{2-}_3 и повышенную концентрацию сульфатов. Техногенное влияние также приводило к появлению в подземных водах нитратов, нитритов и повышенной мутности поверхностных вод.

Геотермические условия. Измерения температуры подземных вод и горных пород, проведённые в процессе гидрогеологической документации СМТ, а также, геотермические исследования в скважинах позволили составить представление о температурном режиме горных пород и подземных вод по трассе СМТ.

На западном участке тоннелем пересечён Итыкитский очаг разгрузки термальных вод. Там выделяется две зоны: первая в рыхлых отложениях Ангараканской впадины с максимальной температурой 28^0 С и, вторая, вблизи шахтного ствола 4, с максимальной температурой 35°С. Разница в температуре этих зон обусловлена, в основном, различным количеством разбавляющих термы холодных метеогенных вод, инфильтрующихся в четвертичные отложения и кристаллические породы. Этот вывод подтверждается данными по химическому составу термальных вод.

Окусиканский очаг разгрузки термальных вод, вскрытый на восточном участке СМТ (ПК 89+03÷75+50) характеризуется боле высокой (до 44°С) температурой и чёткими границами. В выработки СМТ термальные воды поступают по трещинам и разломам в гранитах Восточного тектонического блока, гидравлически связанного с термовыводящими разломами Перевальной зоны тектонического нарушения.

Повышенный геотермический градиент чётко фиксируется в III и IV тектонических зонах, на небольшом участке в Троговой тектонической зоне, в интервалах ПК 46 + 00 ÷ ПК 36 + 00 на западном участке СМТ и ПК 57 + 00 ÷ ПК 66 + 00 — на восточном. Эти зоны следует рассматривать, как наиболее активные на современном этапе геологического развития участка. Выделенные геотермические зоны отражают особенности блокового строения массива. Их границы, как правило, совпадают с границами тектонических блоков.

В подходной штольне №1 от шахтного ствола №2 на интервале ПК 14 + 50 ÷ 16 + 50 температура подземных вод повышена до 8°С. На этом интервале штольни в монолитных и слабо трещиноватых гранитах регистрировались процессы стреляния горных пород. Эта температурная аномалия поля массива не связана непосредственно с подтоком термальных вод, она приурочена к зоне « эмбриональной впадины или зарождающегося гольцового грабена» Высокие градиенты температуры по длине выработки при отсутствии явно выраженных изменений фильтрационных свойств горных пород подчёркивают связь этой аномалии с современной тектонической активностью этого участка.

Зоны пониженных (до 1-2°С) температур горных пород и подземных вод на горизонте СМТ обусловлены наличием потоков инфильтрующихся холодных метеогенных и поверхностных вод по разломам и зонам трещиноватости, что в большинстве случаев подтверждается увеличением водопритоков в этих интервалах и изменениями химического состава подземных вод в сторону уменьшения их минерализации.

Загрязнение подземных вод. При строительстве СМТ проявлялось незначительное техногенное загрязнение подземных вод, как правило, связанное с цементационными работам и и химическим закреплением разломных зон. Попадание цемента в воду вызывает резкое подщелачивание её — величина pH повышается до 9-9,4 и более, в составе макрокомпонентов появлялись гидроксил — и карбонат-ионы (до50-70%-экв.), общая минерализация увеличивается до 2-3 раз.

В дренажных сточных водах, в случае, когда проводились буро-взрывные работы, отмечалось наличие азотистых соединений (до 2-3 мг/л нитратов, до 0,3-0,4 мг/л нитритов, до 1-2 мг/л аммония). В настоящее время после окончания проходческих работ содержание в воде

вредных элементов соответствует предельно допустимым нормам.

Агрессивность подземных вод. Степень агрессивности воздействия подземных вод на бетонные конструкции тоннеля в зависимости от показателя агрессивности среды подразделяются на два вида [2] (табл.3).

Агрессивность по содержанию бикарбонатной щелочности. Оценка агрессивности воды приводится по содержанию бикарбонатной щёлочности НСО. При содержании бикарбонатной щёлочности более 1.4 мг-экв/л вода будет неагрессивной.

В подземных водах участка СМТ отмечается наличие выщелачивающей агрессивности, обусловленной малой бикарбонатной щёлочностью. Содержание иона HCO_3 колеблется от 0,39 мг-экв/л до 1,4 мг-экв/л. Наиболее низкие содержания иона HCO_3 отмечаются в холодных водах — 0,7 мг-экв/л. В подавляющем большинстве проб содержание иона HCO_3 находится в пределах 0,7 — 1,4 мг-экв/л. Следовательно, подземные воды участка строительства по коррозии 1 вида, характеризующейся выщелачиванием растворимых компонентов бетона, относятся к слабоагрессивным и среднеагрессивным ($HCO_3$0,7мг-экв/л).

Процессы коррозии II вида характеризуются содержанием в воде свободной углекислоты (CO_2), магнезиальных солей, едких щелочей и водородным показателем (pH).

Агрессивность по содержанию свободной углекислоты (CO_2). Свободная углекислота — это газ, растворённый в воде. Та часть свободной углекислоты, которая непосредственно вступает в реакцию с соединениями кальция, называется агрессивной углекислотой. При минимально возможных содержаниях ионов Cl и SO^{2-}_4 и при минимальной бикарбонатной щёлочности вода является агрессивной при содержании углекислоты более 15 мг-экв/л. По содержанию магнезиальных солей и едких щелочей подземные воды района строительства не агрессивны.

Агрессивность по водородному показателю. Агрессивные свойства подземных вод к бетону проявляются при pH меньше 5,5. Общекислотная агрессивность подземных вод на участке строительства отсутствует (pH — 6,78 — 10,09).

Сульфатная агрессия, относящаяся оценивается по содержанию ионов SO^{2-}_4. При содержании сульфат-иона менее 250 мг/л воды не агрессивны. Максимальное содержание сульфат-иона в подземных водах — 29,6 мг/л, поэтому сульфатная агрессия отсутствует. Таким образом, в результате проведённых работ можно сделать основной вывод о том, что в подземных водах восточного участка Северомуйского тоннеля отмечается наличие выщелачивающей агрессивности, обусловленной малой бикарбонатной щелочностью (менее 1,4 мг-экв/л), характеризующейся выщелачиванием растворимых компонентов бетона (1 вид коррозии).

Геокриологические условия. В региональном плане по характеру распространения многолетнемёрзлых пород (ММП) участок СМТ

Табл. 3

Степень агрессивности воздействия подземных вод на бетонные конструкции тоннеля.

Вид коррозии	Коррозийное воздействие	Показатели агрессивности
1	Выщелачивание растворимых компонентов бетона.	Бикарбонатная щёлочность.
2	Образование растворимых соединений или продуктов, не обладающих вяжущими свойствами, в результате обменных реакций между компонентами цементного камня и жидкой агрессивной средой.	Водородный показатель pH. Содержание свободной углекислоты CO_2. Содержание магнезиальных солей (в пересчёте на ион Mg2+). Содержание едких щелочей (в пересчёте на ионы K^+ и Na^+).
2	Образование и накопление в бетоне малорастворимых солей, характеризующихся увеличением объёма при переходе в твёрдые фазы	Содержание сульфатов (в пересчёте на ионы SO^{2-}_4)

относится к области развития прерывистой криолитозоны, внутри которой выделяются площади: преимущественно сплошного, собственно прерывистого и островного развития ММП. Площади преимущественно сплошного развития криолитозоны тяготеют в основном к гольцовым и предгольцовым участкам с высотами более 1400 м над уровнем моря. При мощности ММП 300-500 м их подошвы залегают на отметке 1100-1300 м. Все горные выработки СМТ находятся на более низких уровнях и ММП влияют на них как фактор, определяющий условия питания подземных вод и температурное поле массива.

Площади собственно прерывистого распространения ММП имеют преобладающее развитие на участке строительства СМТ. Мощность ММП достигает 200 м, а температура -2°С. Площади островного распространения ММП на участке СМТ приурочены к седловине Ангараканского перевала. ММП встречаются здесь в виде небольших островов в различных понижениях рельефа. Мощность их составляет 12-22 м. Основную часть площади занимают талые породы. Существование мощных таликовых зон связано с отепляющим воздействием высоконапорных трещинно-жильных холодных и термальных вод. Их разгрузка определяется активным неотектоническим режимом территорий. Отсутствие ММП в тектонических разломах вне зависимости от высоты местности является закономерностью распространения криолитозоны на участке Ангараканского перевала Северо-Муйского хребта. Наличие обширных площадей распространения талых пород способствует накоплению в рыхлых покровных отложениях и трещиноватых гранитах аномально высоких для криогидрогеологических массивов запасов подземных вод.

На западном припортальном участке в зимнее время при неработающих тепло-вентиляционных установках (ТВУ) грунты промерзали на глубину до 1 метра от обделки тоннеля на протяжении 300 метров от портальных ворот, т. е. до ПК 62+83. Соответственно происходило оледенение сосредоточенных (дренажных) выходов и отдельных течей воды через обделку тоннеля. В настоящее время, при включении и непрерывной работе ТВУ, обмерзание водосбросных лотков наблюдается лишь в непосредственной близости от портальных ворот, в пределах 10—20 м.

На восточном припортальном участке в процессе проходки разведочно - дренажной штольни была вскрыта зона разгрузки глубинных термальных вод (температура воды достигала +47°С). Однако, несмотря на этот факт, промерзание грунтов, оледенение выходов дренажных вод и течей через обделку тоннеля наблюдалось на протяжении 450 — 500 метров от ворот портала, до ПК 83+63.

В настоящее время на обоих припортальных участках тоннеля (западном и восточном) работают тепловентиляционные установки, сооруженные в 300 метрах от портальных ворот. Обмерзания лотков и стенок тоннеля от порталов до ТВУ не наблюдается. Фактов многолетней (вечной) мерзлоты на всем протяжении тоннеля не установлено.

Выводы и рекомендации. Построен тоннель протяженностью 15343м, транспортно —дренажная штольня с множеством вспомогательных выработок, пройденных под Северомуйским хребтом. Кроме того, было сооружено четыре шахтных ствола глубиной от 167 до 336м. По инженерно-геологическим условиям Северо-Муйский тоннель (СМТ) является сложнейшим объектом, не имеющим аналогов в мировой и отечественной практике тоннелестроения. На основании многолетних наблюдений даются следующие выводы и рекомендации:

- гидрогеологический режим подземных вод изменяется, как естественно сезонно (в течение года), так и искусственно — в процессе вскрытия водонасыщенных зон и горизонтов;
- в процессе строительства СМТ в различных инженерно-геологических условиях применялись новейшие методы проходки, закрепления грунтов, сооружения постоянной обделки подземных горных выработок, применялась современная техника отечественного и зарубежного производства, что позволило закончить строительство тоннеля в эксплуатацию в декабре 2003 года;
- при проектировании и выполнении отдельных видов работ учитывались не все данные, полученные при изыскательских и геолого-разведочных работах, а также, опыт, накопленный строителями при проходке выработок тоннеля;
- существенную роль при проходке водонасыщенных участков сыграло вертикальное водопонижение;
- одним из главных факторов, осложнившим строительство тоннеля, явилась высокая

сейсмическая активность района, в пределах которого находится трасса СМТ;

- с целью контроля гидростатического и горного давления генпроектировщиком Ленметрогипротрансом предусмотрено установка специальных датчиков, наблюдения по которым велись до сдачи тоннеля в эксплуатацию, дальнейший контроль над горным и гидростатическим давлением обеспечит безопасность эксплуатации тоннеля;

- по окончании строительства в самом тоннеле, РТДШ и БДШ была создана сеть горизонтального скважинного и шпурового дренажа для снижения гидростатического давления на обделку тоннеля;

- при проходке горных выработок в сложных горно-геологических условиях необходимо применять опережающее разведочное бурение на всех участках без исключения, сгущая сеть разведочных скважин до получения наиболее полного представления об инженерно-геологических и гидрогеологических условиях при проходке;

- при прогнозе прорыва водно-грунтовых масс в горные выработки применять химическое закрепление грунтов, как наиболее эффективный в настоящее время метод.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Инструкция по инженерно-геологическим изысканиям для проектирования и строительства метрополитенов, горных железнодорожных и автодорожных тоннелей // ВСН 190-78, Москва: Минтрансстрой, 1978.
2. СНиП 2.03.11-85.Защита строительных конструкций от коррозии. /Минстрой России. - М.: ГП ЦПП, 1996. — 56 с.

Толстых О.Д., Гозбенко В.Е.

УДК 681.3:[001+62+33]

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕСТОВОЙ БАЗЫ ПО КЛАССИЧЕСКИМ РАЗДЕЛАМ И СПЕЦИАЛЬНЫМ ГЛАВАМ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ

С каждым годом вопросам тестирования уделяется все больше внимания. Системы тестирования глубоко внедряются в процесс обучения в школах, колледжах, лицеях, гимназиях, вузах: от промежуточного тестирования по конкретным разделам изучаемой дисциплины до итогового тестирования, например, в школьной системе - единый государственный экзамен.

Очевидно, нет необходимости спорить о важности математической подготовки студентов технических вузов. Дисциплина «Математика», а также снецглавы высшей математики, является важнейшей в течение первых двух лет обучения, на ней базируются все специальные технические дисциплины. В настоящее время бессмысленно отрицать, что тестирование и сравнительный анализ его результатов являются одним из важнейших факторов в обучении студентов основам высшей математики. Тестирование и сравнительный анализ его результатов позволяет выявить имеющиеся пробелы, наиболее трудно воспринимаемые разделы, сделать выводы об осознанности применения студентами математического аппарата в прикладных вопросах.

В связи с этим на первый план выходит задача о структуре и содержании тестовой базы.

Распределение аудиторного времени на изучение конкретного раздела в соответствии со стандартами и рабочими программами по 25 специальностям ИрГУПС представлено в таблице 1.

Анализ показывает, что количество часов на изучение темы, раздела может сильно варьироваться, например, в зависимости от специальности.

- линейная алгебра: от 12-16 часов на общетехнических и экономических специальностях до 28 на специальности ПО и 36 на ЗИ;

Табл. 1

Распределение аудиторного времени по разделам высшей математики.

№	Раздел	Диапазон min-max
1	Линейная алгебра	12-36 (ЗИ)
2	Векторная алгебра	8-14 (ТМ)
3	Аналитическая геометрия	10-20 (ПО)
4	Введение в анализ	14-24 (ЗИ)
5	Дифференциальное исчисление функций одной переменной	16-36 (ЗИ)
6	Дифференциальное исчисление функций нескольких переменных	8-18 (ЗИ)
7	Интегральное исчисление функций одной переменной	22-32 (ТМ)
8	Интегральное исчисление функций нескольких переменных	6-22 (ЗИ)
9	Дифференциальные уравнения	16-34 (ЗИ)
10	Векторный анализ	4-8 (ТМ, ПС, ИС)
11	Ряды	8-32 (ЗИ)
12	Гармонический анализ (ряды Фурье). Уравнения математической физики	6-12 (ЗИ) 6-10 (ПС)
13	Комплексные числа. ТФКП	4-6 8-48 (ЗИ)
14	Операционное исчисление	6-16 (ЗИ)
15	Теория вероятностей	30 (УПП) - 62 (ИС)
16	Математическая статистика. Элементы корреляционного анализа	10-22 (УПП)
17	Случайные процессы. СМО	4-38 (ПС)
18	Эконометрика	54 (Б, Ф)
19	Экономико-математические методы	8-42 (УА)
20	Математическое программирование	8 (С, МТ) - 54 (УПП)
21	Численные методы, методы оптимизации	8-72 (ПО)
22	Дискретная математика. Теория множеств	8 (УН, УК) - 68 (ПО)
23	Математическая логика и теория алгоритмов	14 (УН)-51 (ПО)
24	Вариационное исчисление	4 (В, С, МТ)-10(ТМ,ПС)
25	Моделирование систем и процессов	54 (ЭНС, АТС)

- дифференциальное исчисление функций одной переменной, дифференциальные уравнения: от 16-18 на общетехнических и экономических специальностях до 34-36 на ЗИ;

- комплексные числа, ТФКП: от 12-14 часов на УПП и экономических специальностях, 16-20 на общетехнических специальностях до 52 на ЗИ;

- теория вероятностей: от 30 на УПП, 40-46 на экономических и общетехнических специальностях до 56 на ПО, 59-62 на ТМ, ПС, ИС;

- математическая статистика, корреляционный анализ: от 10-16 на общетехнических и экономических специальностях, до 20-22 на ИС, Э, ПС, УПП;

- случайные процессы, СМО: от 4-6 на общетехнических, 8-12 на экономических специальностях, до 26 на УПП, 38 на ПС.

Некоторые специальные главы изучаются далеко не на всех специальностях. Проведенный анализ дает возможность выделить перво-

очередные задачи при создании банка тестовых заданий.

1. Подробная, достаточно полная, четкая структура тестовой базы по каждому разделу.

2. Содержание тестовой базы: полнота, корректность математических формулировок.

3. Соответствие содержательной части тестовой базы структуре.

При хорошо структурированной базе задания фактически располагаются по типам и по уровню сложности, что позволяет составить тест по разделу в зависимости от специальности, количества часов на изучение раздела, темы, уровня подготовки студентов, времени на выполнение теста и т.д.; легко сориентироваться по структуре и не включать в тест задания более высокого уровня сложности, а также не изучаемые на конкретной специальности.

К примеру, в зависимости от программы можно включать или не включать в тест по теме «Комплексные числа» подразделы: комплексные числа в определителях, рациональные уравнения с комплексными корнями; в тест по дифференциальному исчислению функций одной переменной - блок заданий из подраздела «Характеристика поведения функции по графикам функции f(x), производных f'(x) и f''(x)»; в тест по линейной алгебре - подразделы «Собственные значения и векторы матрицы», «Квадратичные формы»; в тест по аналитической геометрии - подраздел «Приведение линий 2-ого порядка к каноническому виду методом квадратичных форм (с помощью собственных значений и векторов матрицы формы)» и т.д.

Задачи 2, 3, на наш взгляд, не требуют особых комментариев.

Отметим лишь, что тестовая база раздела должна быть не только полной по охвату типов задач, теоретических положений, но и достаточно большой по количеству. На взгляд автора, по каждому выделенному пункту необходимо минимум 15-20 тестовых заданий, так как на тестирование может быть приглашена подгруппа от 10 до 15 человек или даже группа 20-30 человек. В целом на 8-10 часов, как видится автору, необходимо минимум 150-200 тестов. В процессе работы произойдет естественный отсев тестов. Если сделать меньше тестов, то тестовая база может оказаться недостаточной для тестирования по конкретной теме.

Вслед за первоочередными задачами по содержанию тестовой базы хотелось бы отметить еще одну задачу - техническое исполнение.

В экспериментальной тестовой базе прежде всего надо обратить внимание на те моменты, которые мешают правильному выполнению задания и оценке правильности выполнения. Это, прежде всего, тестовые задания по открытой форме; на соответствие, где идет искажение текста, рисунков. На наш взгляд, задача доведения технического исполнения до уровня мировых стандартов на данном этапе второстепенная. Если тестовое задание корректно с математической точки зрения, техническое оформление задания не противоречит правилам русского языка, формулировка позволяет правильно выполнить задание, то некоторые погрешности в оформлении можно допустить. Выполнению задания не помешает то, что в конце стоит «:», в теле теста есть обозначение нужной величины, формулировка начинается с «для...», «если...». Так оформлены многие тестовые задания официальной тестовой базы центра тестирования, по которой проходило тестирование во время государственной аттестации ИрГУПС.

В заключении, хочется отметить, что подробно структурированная и достаточно полная тестовая база даст преподавателю возможность подготовить тест для конкретной специальности в соответствии с рабочей программой и стандартами с целью проведения промежуточной аттестации в семестре, а также составить выборочный тест с целью итоговой аттестации по семестру или всему курсу в целом.

Колебания, управление, качество

60-летие - время подвести итоги

ЛОНЦИХ ПАВЕЛ АБРАМОВИч

Исполняется 60 лет Павлу Абрамовичу Лонциху. Он родился в апреле 1947г. Учился в 11-ой средней школе г. Иркутска или школе И.А.Дрица, как ее в то время называли. Школа давала хороший старт жизненному пути выпускникам.

Свою жизнь в науке, образовании, производстве П.А. Лонцих связал с механикой. В 1965г. поступил и в 1970г. закончил, получив «красный диплом» инженера-механика по самолетостроению, Иркутский государственный технический университет; после ВУЗа работал инженером-конструктором в Иркутском филиале НИИ авиационных технологий(НИАТ); в 1971 г. поступил в аспирантуру ИрГТУ, где его научным руководителем стал проф. С.В. Елисеев. Кандидатскую диссертацию, посвященную изучению активных пневматических виброзащитных систем, П. А. Лонцих защитил в г. Новосибирске, в НЭТИ, в 1975г. Проблема управления колебаниями в различных целях, как для генерирования их в технологических целей при вибросепарации, виброперемещении, синтезе машин и оборудования в таких отраслях, как строительство, обогатительное производство, так и для систем виброударозащиты, в т.ч., активного вида,- стала определяющей в работе ПА. Лонциха. Некоторые результаты исследований в этом направлении были с интересом приняты во время зарубежной научной стажировки П.А.Лонциха в Польшу в 1977-78г.г. Появились статьи, опубликованные Польской Академией Наук и доклады, сделанные на конференциях Польского Академического общества инженеров-механиков.

Научные результаты, достигнутые П.А.Лонцих, сочетались со служебным ростом. Начиная с аспирантуры и до сегодняшнего дня, он связан с ИрГТУ: аспирант, ассистент, доцент и, с 1986г., - заведующий кафедрой теоретической механики ИрГТУ.

Выполняемые под руководством проф. П.А.Лонциха научно-исследовательские работы имеют как региональное так и федеральное значение. В течении ряда лет его кафедра принимала участие в выполнении Федеральных программ, организованных министерством образования и науки, в том числе:

- Динамика виброактивных систем и управление техническим состоянием машин по результатам вибродиагностики. Проект ИрГТУ, 2000г.

- Динамика виброактивных систем и синтез систем виброизоляции технологического оборудования обогатительного производства. Проект ИрГТУ, 2002г.

Кафедра на этой основе ведет договора с предприятиями: Акционерной Компанией АЛРОСА и ее подразделениями: Удачнинским, Айхальским и Нюрбинским ГОКами.

В 2004г. П.А.Лонцих инициировал и провел большую работу по лицензированию ИрГТУ на право ведения образовательной деятельности по направлению 220500 «Управление качеством». Специалисты по управлению качеством, безусловно, востребованы в различных областях хозяйственной и предпринимательской деятельности, на предприятиях, связанных с сертификацией систем управления и продукции, аудиторской деятельностью, в страховых компаниях, при

разработке методов и средств повышения безопасности и экологической проработке проектов и решений, в системах организации информационных технологий и защиты информации, в системах и структурах управления инвестиционными проектами.

В 2005 году Академией проблем качества РФ (АПК) было принято Решение о создании Иркутского регионального отделения АПК. В 2005 г. в ИрГТУ по инициативе Лонцих П.А. было создано Региональное Восточно-Сибирское инновационное отделение Европейского центра качества с последующей организацией в октябре 2006 г. Иркутского филиала Ассоциации по сертификации «Русский Регистр». П.А. Лонцих организовал ряд совещаний и конференций по проблемам качества. Так, в 2006 г. в рамках проекта ТЕМПУС Т034804 на базе Иркутского Государственного технического университета состоялся международный семинар: «Улучшение менеджмента на основе модели «Превосходство бизнеса» EFQM и критериев Европейской премии качества».

Семинар состоялся при поддержке: Администрации Иркутской области, Академии проблем качества, Европейского центра по качеству, Иркутского государственного технического университета, Университета Кренфилд (Великобритания), Ассоциации «Русский регистр». В работе семинара приняло участие 30 участников. Среди них представители ВУЗов и ССУЗов городов Иркутска, Читы, Томска, Омска, Братска; в т.ч. такие как Иркутский государственный технический университет, Читинский Государственный университет, Омский государственный университет путей сообщения, Томский эко-номико- юридический институт, Иркутский институт международного туризма, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутская государственная сельскохозяйственная академия, Сибирский институт права, эконом, и управления, Иркутский государственный лингвистический университет, Иркутские техникум экономики и права, гидрометеорологический техникум.

На кафедре под руководством зав.кафедрой, проф. П.А.Лонцих действует аспирантура. П.А.Лонцих является членом диссертационного совета по рассмотрению докторских диссертаций по специальностям 05.02.08 «Технология машиностроения» и 05.03.01 - «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки». Под его научным руководством подготовлено пять диссертационных работ.

П.А.Лонцих является автором более 70 научных трудов, в т.ч., 10 монографий. Получено 5 авторских свидетельств и патентов. Педагогическая и производственная деятельность П.А. Лонцих неоднократно отмечалась приказами по университету и Минобразования РФ.

Научные разработки последних лет нашли отражение в публикациях:

1. П.А.Лонцих Динамическое гашение крутильных колебаний //Zagadnienia drgan nieliniowych: Polska Akademia nauk, №20.-Warszawa,1979.-S.71-76.
2. П.А.Лонцих, Tlumenie drgan mechanicznych robotow przemyslowych (Демпфирование механических колебаний промышленных роботов).//Przeglad mechaniczny. № 24. Обзор механики. - Варшава, 1990- С.34-42.
3. В.Л. Вейц, Д.В.Васильков, П.А.Лонцих. Динамика стопорных режимов в приводах станков. - Санкт-Петербург, 1999.- 202 с.
4. В.Л.Вейц, В.В.Максаров, П.А. Лонцих/ Динамические процессы, оценка и обеспечение качества технологических систем механической обработки.-Иркутск: ИрГТУ, 2001.- 199 с.
5. В.Л.Вейц, А.Е.Кочура, П.А.Лонцих. Структурированные модели и методы расчета сложных управляемых систем в технике и экономике / - Ростов-на-Дону.- 2002. -200 с.
6. П.А.Лонцих, А.Н.Шулешко/ Защита технологических машиностроительных систем и оборудования от вибраций и ударов /. - Иркутск, 2002.-178 с.
7. П.А. Лонцих Обеспечение качества и управление динамическими процессами технологических систем.- Ростов-на-Дону, 2003.- 236 с.
8. П.А. Лонцих, В.Л.Вейц, А.Н. Шулешко Системы управления качеством и оптимизация инструментов качества. - Иркутск, 2007.-248 с.

П.А. Лонциха отличает врожденное чувство юмора, которое постоянно находит отражение в стихах и шутках. Его школьные друзья и однокашники относятся к нему с огромным уважением.

Желаем П.А. Лонциху дальнейших творческих успехов.

Друзья. Коллеги. Ученики.

ДМИТРЕНКО АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

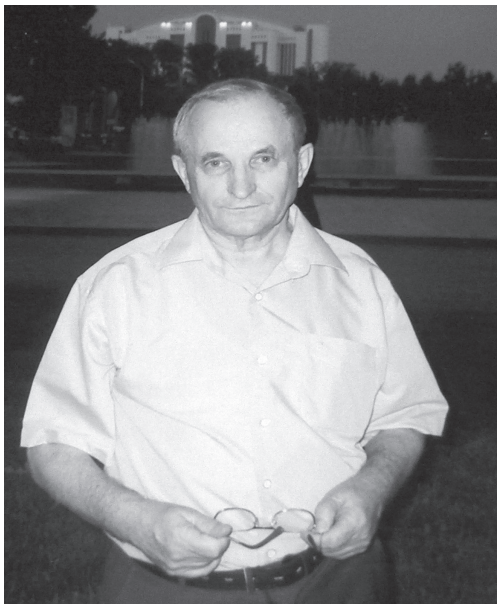
Редакция журнала поздравляет с днем рождения профессора по кафедре "Эксплуатация железных дорог" Сибирского государственного университета путей сообщения, д.т.н. ДМИТРЕНКО Алексея Васильевича: 22 февраля ему исполняется 68 лет. Десять лет назад (23 мая 1997) года он первым среди сотрудников ИрИИТа, ныне ИрГУПС, защитил докторскую диссертацию.

Его жизненный путь, приемы работы отличаются необычностью, а также часто исключением из правил, которыми характеризуют людей его профессии. Пятьдесят лет назад он поступил учиться в Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта (НИИЖТ) по специальности «Эксплуатация железных дорог».

Ещё находясь в институте, параллельно с обучением специальным дисциплинам, А. В. Дмитренко в совершенстве освоил СТЕНОГРАФИЮ, которую успешно применяет и по настоящее время в своей практической и творческой деятельности. Знание секретов ускоренной записи позволяет ему значительно повышать производительность труда при написании новых научных статей и отчетов.

Знание стенографии позволяет ему поднять на новый более высокий уровень характер своего мышления в творческих процессах. Ведь, в отличие от всех других, свое творческое полезное время он тратит преимущественно на создание новых творческих текстов, а не на простое запоминание фраз, появляющихся в процессе умственной деятельности. Использование в течение нескольких десятилетий знаний стенографии позволило ему достичь высоких результатов в научной деятельности, осуществлять творческий процесс в различных областях знаний.

После окончания института Дмитренко работал на Златоустовском отделении Южно-Уральской железной дороги: дежурным по парку, маневровым диспетчером, а также старшим инженеров сортировочной станции, поездным диспетчером и зам. старшего диспетчера. Здесь он стал накапливать практический опыт, который пригодился ему в работу



на производстве, а также в дальнейшей творческой работе в вузе.

В производственной деятельности, как и в последующей творческой деятельности у него были и курьезы.

Так, с его согласия, как поездного диспетчера, после отправления с начальной станции им был пропущен по участку грузовой поезд, в котором хвостовой вагон оказался без тормозной площадки. С него было взято объяснение и объявлен выговор. Однако через два месяца данное положение отменили и сейчас на железнодорожном транспорте вообще не обращаются грузовые поезда с тормозной площадкой в хвостовом вагоне.

Первым научным выводом его был о том, что жесткие требования и особый контроль за выполнением определенных технико-экономических показателей, например все 100 процентов пропуска пассажирских поездов по графику, вызывает рост расходов и может оказаться экономически нецелесообразным.

Данный первый научный вывод (исключение из правил) он взял на вооружение и стал в дальнейшем успешно применять в своей жизни. Он был податливым в обращении, делал послабления по мелким нарушениям. Большая часть людей считали это своим или

его недостатком. Однако, это позволило ему на почве устранения конфликтов, вызванных жесткостью требований, добиваться экономии времени, достигать высокой производительности труда и тем самым добиваться более высоких творческих результатов, по сравнению со стандартной технологией работы сотрудников. Первый свой вывод «Жесткость в требованиях является не достоинством, а недостатком» в течение длительного времени он успешно применял в практической деятельности.

ЕЩЁ учась с институте, ДМИТРЕНКО А. В. освоил диалектический метод исследования, который гласит, что наибольшие достижения возможны на грани наук, а в научных исследованиях необходимо больше применять новые методы исследования. Поэтому он стал самостоятельно изучать ряд наук, что позволило ему в последующем получить много новых научных выводов в различных областях человеческой деятельности.

Его докторская диссертация была посвящена вопросу обеспечения устойчивости в пропуске поездов по стыковым пунктам на сети железных дорог. Выбор порядка планирования было предложено вести не по характеру пропуска поездов только по своему участку, как это рекомендовалось ранее, а в целом, для всей сети железных дорог сразу. Результаты от действий диспетчерского оказались наилучшими не там, где происходят сами заторы в движении, а в противоположном конце страны. Знания многих наук, позволило ему опубликовать ряд научных трудов, основываюсь на самых важных факторах, оказывающих серьезное влияние на конечные результаты.

Так, официально считается, что отправление неполновесных грузовых поездов является недостатком и вызывает снижение производительности локомотивов. В то же время, в периоды снижения в объемах перевозок появляется избыток поездных локомотивов, которые непроизводительно простаивают. Поэтому отправление неполновесных поездов в практической деятельности позволяет более рационально использовать мощность локомотивов и повысить их производительность.

А. В. Дмитренко участвовал в Международном конкурсе по обеспечению конвертируемости советского рубля, где получил почетную грамоту.

Им были опубликованы научные труды по направлениям:

- рациональная структура сельскохозяйственного производства, с учетом наличия транспортного фактора;
- история развития транспорта, с учетом характера развития научно-технического прогресса;
- организация функционирования экономики, с учетом особенностей размещения транспортной сети на континенте Европа- Азия.

Данные научные труды по новому освещают вопросы об оценке затрат и их эффективности с учетом особенностей длительной перспективы.

В его статьях было показано, что на оптимальную структуру сельскохозяйственного производства основное внимание оказывает не наличие вида собственности (частной или общественной), а наличие транспортного фактора. При оценке рациональной структуры сельскохозяйственного производства предлагается всю территорию каждой области разделить на три основные группы: пригородную, среднюю зону и окраины областей.

В пригородной зоне возможен избыток рабочей силы, от желающих иметь собственный земельный участок. Поэтому здесь целесообразна частная собственность с малыми наделами, в том числе и требующая больших затрат на рабочую силу. В средней зоне целесообразно осуществлять крупное высокомеханизированное производство с преобладанием общественных форм собственности. На окраинах целесообразно в подавляющей части организовать ведение животноводства, требующее малого количества дорог и небольших капитальных вложений и низких текущих затрат в производство продуктов питания.

При оценке характера хозяйственной деятельности страны было показано, что основными факторами роста экономики являются не СОЦИАЛЬНЫЕ ПРИЧИНЫ, как это считается в настоящее время, а ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ. Это применение в практической деятельности людей достижений науки и техники, использование капитальных вложений, повышение квалификации сотрудников. Для технологических причин оказалось, что эффект от действий, применяемых отдельными лицами на производстве, оказался не на своем рабочем месте и не в свою смену.

Большая часть эффекта от проводимых сотрудниками действий, оказывается в более поздние сроки и на других предприятиях. Для технологических причин то, что выгодно для отдельных личностей, становится невыгодным в целом для всего государства. Так, большая часть лиц старается меньше платить налоги государству. Поэтому часто отдельным лицам становится невыгодными меры, дающие наилучшие результаты в росте экономики в целом для всей страны.

О РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАНИЯ.

На начальном этапе развития человечества была малая плотность населения, города имели малую величину.

Большая часть материальных ценностей в ТОТ ПЕРИОД с развитием технических средств направлялась на развитие инфраструктуры. Обычно такие технические средства, например, устройства станций, депо, перегонов магистральных железнодорожных линий не требуют больших затрат на образование специалистов, обеспечивающих функционирование данных технических средств.

Однако на современном этапе значительная часть материальных ценностей направляется на создание сложной технологической аппаратуры. При этом в большом количестве потребовались специалисты высокой квалификации для обеспечения функционирования в большом количестве вновь созданной сложной техники, например компьютеров. Поэтому для настоящего времени резко возросла потребность в специальных технических учебных заведениях.

Стоит вопрос о рациональном соотношении в производственном процессе частной и общественной форм собственности. Считается, что частная форма собственности и предпринимательство являются наиболее быстрого достижения богатства. В то же время, в конце 19-го века большая часть лиц, например, фермеров, в США имели частную собственность и вели самостоятельное хозяйство, а сейчас доля собственников существенно сократилась.

Это говорит о том, что если бы владение собственностью было самым важным фактором роста богатства, то уже давно все жили бы в изобилии, были богатыми. Однако, в прошлом личная собственность не дала возможность людям стать богатыми. Когда на современном этапе научно-технического прогресса объем производства и жизненный уровень населения возрастают за счет капитальных вложений, технических средств, научной организации труда, квалификации, конкуренция вызывает дополнительный рост затрат.

Его жизненный путь и способы обеспечения достижения успехов в написании научных трудов с новыми идеями являются образцом для подражания молодым специалистам. Система организации его труда отличается организованностью, умением направлять свое время на решение самых важных вопросов, стоящих перед экономической и хозяйственной деятельностью страны.

Редакция журнала желает Дмитренко дальнейших успехов в решении важнейших вопросов развития транспорта, организации функционирования экономической деятельности страны.

СВИТАЧЕВ АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ

Свитачев Анатолий Иванович — зав. кафедрой Общематематических и естественно научных дисциплин Красноярского института железнодорожного транспорта - филиала ИрГУПС в г. Красноярске, профессор, доктор технических наук, родился в 1952 году. Специальность — "Математика". Женат, имеет 2-х детей.

Справка о научной, педагогической и производственной деятельности:

1974-75 г.г — младший научный сотрудник, ассистент каф. Прикладной математики Красноярского гос. университета;

1975-76 г.г — служба в Сов. Армии;

1976-78 г.г — ассистент каф. Высшей математики Красноярский институт цветных металлов;

1978-80 г.г - ст. инженер-программист, руководитель группы отдела АСУП, Красноярский судостроительный завод, занимался разработкой и внедрением методов и моделей сетевого планирования при строительстве судов;

1980-94 г.г - ассистент, ст. преподаватель каф. Высшая математика, 1981-1984 г.г.- аспирант каф. Тракторы и автомобили, доцент, зав. каф. Высшая математика, декан заочного отделения Красноярского аграрного университета (1989-1994), занимался вопросами исследования динамической нагруженности силовых передач тракторов, в 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности 01.02.06 - динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры в НАТИ (г. Москва) на тему "Совершенствование методов анализа и синтеза динамических свойств силовой передачи трактора (на примере промышленной модификации гусеничного трактора)".

С 1994 года работает в Красноярском институте железнодорожного транспорта. В 1994-1996 г.г. исполнял обязанности декана Красноярского общетехнического факультета Иркутского института железнодорожного транспорта. В настоящее время - профессор, зав. кафедрой Общематематических и естественнонаучных дисциплин Красноярского института железнодорожного транспорта - филиала Иркутского государственного университета путей сообщения в г. Красноярске, занимается моделированием многомассовых динамических систем, анализом и оптимизацией динамических свойств силовых передач сложных механических конструкций и систем, в 2005 г. защитил докторскую диссертацию по специальности 01.02.06 - динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры в ИрГУПС (г.Иркутск) на тему "Моделирование и оптимизация динамической нагруженности силовых передач транспортных машин". Занимается педагогической деятельностью, является автором ряда учебно-методических пособий и учебников по высшей математике, теории случайных функций, прикладной математике, динамике машин. Является автором монографии по динамике силовых передач, имеет авторские свидетельства. За большой вклад при подготовке студентов и плодотворную научную деятельность неоднократно поощрялся руководством ВУЗа и начальником Красноярской железной дороги. В 2005 был награжден часами от президента ОАО "РЖД".

Имеет более 50 научных и учебно-методических трудов. Занимается исследованиями в области динамики, надежности и про-

чности машиностроительных конструкций, разработкой математических моделей сложных механических систем и силовых передач мобильных машин и агрегатов, анализом случайных процессов нагруженности трансмиссий тракторов с учетом навесного оборудования, совершенствованием динамических свойств силовых передач относительно конструктивных параметров на основе многокритериальной оптимизации. Часто выступает в качестве оппонента на защитах диссертаций. Результаты теоретических и экспериментальных научных исследований выполненных Свитачевым А.И. внедрены и применяются во многих ВУЗах, НИИ и машиностроительных заводах, использовались при выполнении государственных контрактов по заказу Федерального агентства по науке и инновациям РФ.

Друзья. Коллеги. Ученики

РАЗДЕЛ 1
МЕХАНИКА. ТРАНСПОРТ. МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 519.95

Елисеев С.В., Хоменко А.П. Формирование точностной модели механической цепи манипулятора // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 6-13.

В отличие от известных методов построения точностных моделей механизмов, основанных на линеаризации функций положения, в настоящей статье выведен алгоритм, учитывающий также члены второго порядка малости и построенный на основе теории конечных поворотов. Рассмотрен также автоматизированный способ получения оценок, позволяющих по заданной структуре, свободной от связей манипуляционной системы и предельным первичным ошибкам, определять границы применимости той или иной (линейной или квадратичной) модели точности.

Илл. — 2. Библ. — 6 наим.

УДК 621.01:534

Кузнецов Н. К., Перелыгина А. Ю. Управление колебаниями трехмассовой системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 14-18.

В настоящей статье приводятся результаты исследований задач активного гашения колебаний применительно к трехмассовой расчетной схеме, для которой существует ряд особенностей, которые необходимо учитывать при разработке систем управления колебаниями. В процессе исследований было установлено, в частности, что характер переходного процесса системы определяется соотношениями между приведенными коэффициентами жесткости и приведенными массами. В статье определено оптимальное значение коэффициента усиления, которое обеспечит минимальное время переходного процесса по координате отклонения массы исполнительного механизма от положения равновесия. Показано, что активная компенсация упругих колебаний с помощью дополнительных обратных связей возможна и в трехмассовых колебательных системах.

Илл. — 7. Библ. — 5 наим.

УДК 630.432.31.002.5

Свитачев А. И., Орловский С.Н. Анализ динамических свойств силовых передач лесохозяйственных агрегатов с активными рабочими органами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 19-22.

Конструктивные изменения трактора и выбор конструктивных параметров и режимов работы активных рабочих органов агрегатируемых с ним машин должны сопровождаться проверкой динамической нагруженности силовых передач лесохозяйственных агрегатов. Данная работа посвящена анализу динамической нагруженности силовых передач агрегатов на базе трактора ДТ-75Б с орудием МДН-3 и трактора ЛХТ-55 с плугом.

Илл. - 8. Библ. - 4 наим.

УДК 656.01

Засядко А.А., Упырь Р.Ю., Логунов А.С. Некоторые подходы к задачам динамического синтеза механических колебательных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С.23-36.

Показаны возможности динамического синтеза, позволяющего по заданной передаточной функции системы или по полному комплексному сопротивлению механической цепи построить адекватную структуру. Приводится иллюстративный материал для сравнительной оценки двух подходов — структуры эквивалентных в динамическом отношении САУ и структуры механических цепей, состоящих из двухполюсников.

Илл. — 5. Табл. — 1. Библ. — 7 наим.

УДК 693.5464

Быкова Н.М., Зайнагабдинов Д.А. Математическое моделирование работы тоннельных обделок с учетом геодеформационных воздействий в зонах разломов земной коры // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 37-45.

В качестве модели рассмотрен участок IV зоны Северо - Муйского железнодорожного тоннеля. Целью моделирования является выявление закономерностей напряженно-деформированного состояния в результате проявления разломной геодинамики в виде геодеформационных воздействий, поэтому в модели рассмотрена обделка постоянного сечения. Рассмотрены следующие схемы геодеформационных воздействий: гравитационная неравномерная нагрузк; гравитационная неравномерная нагрузка и смещение горного массива вдоль оси Z - 50 мм, и +50 мм; гравитационная неравномерная нагрузка и смещение одного крыла разлома вверх по оси Y на +100 мм, вниз по оси Y на -100 мм; гравитационная неравномерная нагрузка и горизонтальное поперечное смещение одной стороны разлома по оси X на -100 мм; гравитационная нагрузка и пригруз той же схемы нагрузки на 5%. Выявлены закономерности распределения НДС для обделки, полностью воспринимающей горное давление и расположенной в зоне разлома.

УДК 693.546.4

Ситов И.С., Белокобыльский С.В. Способы и средства изменения динамического состояния технического комплекса для вибрационного заглаживания // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 46-51.

Предложена математическая модель технологической машины для вибрационного заглаживания бетонных поверхностей. Рабочий блок машины имеет в своем составе 4 вибрирующие головки магнитного типа, что позволяет использовать структурные подходы для определения условий совместной работы нескольких вибраторов. Показано, что при произвольном выборе параметров механической системы возникают связанные колебания, отрицательно влияющие на частоту заглаживания. Получены необходимые условия для рациональной компоновки.

Илл. — 6. Библ. — 4 наим.

УДК 519.218.2

Синеговская Т.С. Вычисление дифференциальной вероятности распадов частиц // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 52-54.

При изучении ряда процессов физики, связанных с распадами частиц, требуется знание дифференциальных вероятностей таких распадов. В работе получены точные формулы дифференциальных вероятностей трехчастичных распадов. Учтена линейная по зависимость форм-факторов.

Библ. — 3 наим.

УДК 693.5464

Зиновьев А.А., Люблинский В.А., Белых С.А., Бурашников А.А. Обоснование основных требований и выбор материалов для ремонта путевого бетона и бетона обратного свода Северо-Муйского тоннеля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 55-63.

Математическое моделирование конструкции безбалластного пути показало возникновение концентрации напряжений и образовании полостей в зоне контакта бетона основания и путевого бетона. В статье предложено использовать заполнение полостей ремонтным составом по длине пути, что позволяет существенно снизить перемещения конструкции и концентрации напряжений. Ассортимент материалов для ремонта гидротехнических и подземных сооружений весьма значителен, поэтому проведены сравнительные исследования составов с применением различных материалов.

Илл. — 6. Табл. — 2. Библ. — 15 наим.

УДК 693.5464

Ковенькин Д.А., Ливенцев Е.А., Домбровский Ю.П. Экспериментальное исследование работы рельсовых скреплений типа оп-105 и кб-65 при проходе подвижного состава на участках Северо-Муйского тоннеля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 64-68.

Экспериментальные исследования с помощью тензометрического оборудования, позволили определить фактические внешние нагрузки, передающиеся от подвижного состава на элементы верхнего строения пути а также статистических и функциональных закономерностей их появления. Для уменьшения динамических воздействий подвижного состава, передающихся на подрельсовые основания, при проходе подвижного состава, рекомендовано применение более прочных нашпальных резиновых прокладок, армированных лавсаном.

Илл. — 8. Табл. — 3. Библ. — 1 наим.

УДК 693.5464

Быкова Н.М., Исайкин А.С., Моргунов А.Н., Зайнагабдинов Д.А. Измерения деформаций в стенах обделки и путевом бетоне Северо-Муйского тоннеля с использованием фотоупругих датчиков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 69-74.

Проведенный анализ продольных деформаций в стенах и путевом бетоне показывает, что тоннель подвержен неравномерному пространственному деформированию. Общая синхронность деформирования путевого бетона и стен обделки по длине тоннеля совпадает, но на отдельных участках имеет разный характер, что свидетельствует о возможном изгибе тоннеля в плане и разрыве их конструктивных связей.

Илл. — 5. Библ. — 2 наим.

УДК 631.533.17

Дамбаев Ж.Г., Новосельцев В.П., Новосельцев П.В. Экспериментальное исследование процесса трогания с места железнодорожного состава // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 74-78.

Целью работы является разработка способа экспериментального исследования движения железнодорожного состава и оценка на этой основе тягово-сцепных свойств локомотива. В основу предлагаемого эксперимента положен метод непосредственного измерения перемещения состава относительно неподвижного объекта, в качестве которого может быть принята цифровая камера, закрепленная на неподвижной опоре. Камера фиксирует положение состава через равные промежутки времени. Этот способ можно рекомендовать для оценки эксплуатационных качеств локомотивов в реальных условиях предприятий железнодорожного транспорта.

Илл. — 5 наим. Табл. — 2. Библ. — 4 наим.

УДК 658.011.56

Печенкина В.В., Арбатская Н.А. Анализ и моделирование основных показателей работы железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 78-82.

Данная работа посвящена моделированию и анализу основных показателей работы железных дорог на основе корреляционно-регрессионного анализа с целью выбора контролируемых параметров при создании корпоративной системы менеджмента качеством (СМК) ОАО «РЖД».

Илл. - 2. Табл. - 1. Библ. 3 наим.

УДК 725.3

Соколова О.В., Марынич Д.С. Влияние сил морозного пучения на деформации железнодорожного полотна // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 82-86.

В статье рассмотрен распространенный класс деформаций в зимний период в регионах с сезонным промерзанием — пучение грунтов. Рассмотрены типы пучения, причины их возникновения и деформации железнодорожного полотна, развивающиеся от действия сил морозного пучения. Приведены критерии оценка морозоопасности земляного полотна из крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем, которые позволяют оценивать их степень пучинистости и составлять прогноз деформации основания сооружений.

Библ. — 3 наим.

РАЗДЕЛ 2
УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.01

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.- С. 88-99.

Предлагается оригинальный подход к рассмотрению возможностей изменения динамических свойств механических систем, если последовательное соединение исходных элементов будет происходить через введение специального элемента — рычаг. По-существу такое звено выполняет функцию звена-координатора. При введении для рычага условий поворота и учете массоинерционных свойств, предлагается процедура определения приведенных характеристик, например, при соединении двух пружин. Показаны возникающие особенности и возможности. При этом обычные результаты последовательного соединения представляют собой частный случай общего подхода.

Илл. — 22. Библ. — 4 наим.

УДК 621.311

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Модели автотрансформаторов для расчета режимов электрических систем в фазных координатах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 100-104.

Предложена методика моделирования силовых автотрансформаторов в фазных координатах с учетом специфики соединения их обмоток и распределения магнитных потоков в сердечнике. Получены соотношения, позволяющие определять параметры моделей на основе справочных данных.

Илл. - 1. Библ. - 7 наим.

УДК 621.311

Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Анализ электромагнитного влияния силового кабеля на подземный трубопровод // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 104-109.

Проанализировано электромагнитное влияние кабельных линий 10 кВ на подземные трубопроводы. На основе теоретического анализа и расчетов с помощью сертифицированного Госстандартом РФ комплекса программ FLOW3 показано, что даже в случае наихудшего сочетания параметров пересечения кабельной линии с трубопроводом коррозионное влияние кабеля на трубопровод отсутствует.

Илл. - 5. Библ. - 6 наим.

УДК 331.108.4:519

Краковский Ю.М., Воложанина О.А. Анализ стратегического положения групп специальностей на рынке образовательных услуг Читинской области // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 110-114.

Проведена оценка стратегического положения групп специальностей на рынке образовательных услуг Читинской области (данное исследование проведено по приему и выпуску студентов). При проведении этого исследования использован модифицированный метод Бостонской консалтинговой группы, адаптированный для анализа стратегического положения образовательных модулей (вузы, специальности и т.д.) на исследуемом региональном рынке. Проведено сравнение двух региональных рынков образовательных услуг — Иркутской и Читинской областей.

Илл. — 3. Табл. — 2. Библ. - 3 наим.

УДК 629.78.086

Демьянов В.В., Комогорцев М.Г., Марюхненко В.С. Оценка качества навигационных определений при решении прикладных задач // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 115-119.

В статье рассмотрена методика оценки качества навигационно-временного обеспечения, которая позволяет количественно оценить эффективность применения СРНС для решения прикладных навигационных задач; позволяет сравнивать различные технические устройства, системы и комплексы с целью выбора наиболее оптимального типа аппаратуры для заданных условий функционирования.

Табл. — 1. Библ. — 8 наим.

УДК 331.108.4:519

Краковская Т.А., Тюрнев А.С. Сравнительный анализ программных продуктов для маркетинговых исследований // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 120-126.

Проведен сравнительный анализ программных продуктов, применяемых для маркетинговых исследований, по функциональным возможностям и цене. Обоснована практическая целесообразность создания программного продукта для исследования рынка образовательных услуг на основе модели Мак-Кинси. Сформирован набор инструментов этого программного продукта.

Илл. — 1. Табл. — 2. Библ. — 3 наим.

УДК 622.44

Рябов Е.В., Китов Б.И., Мухачев Ю.С. Автоматизация рентгенорадиометрического процесса доводки концентратов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 127-130.

Автоматическое обнаружение и извлечение полезного компонента из потока смеси кусков различных веществ относится к важнейшим задачам горнообогатительной, алмазодобывающей, угольной промышленности. Для решения этой проблемы предлагается отказаться от регистрации прошедшего через объект первичного рентгеновского излучения, заменив его регистрацией рассеянного излучения под небольшим углом в прямом направлении.

Илл. — 4. Библ. — 3 наим.

УДК 115:37.01

Носков С.И. Попытка первичного формального анализа результатов экзаменационной сессии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С.131-132.

В статье предложена методика расчета коэффициентов согласованности оценок преподавателей по итогам сессии. «Потребителями» информации о значениях указанных коэффициентов для преподавателей могут быть как они сами, так и деканаты, кафедры, учебный отдел и другие структурные подразделения вуза.

Библ. — 1 наим.

РАЗДЕЛ 3
ЭКОНОМИКА. ИННОВАЦИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 681.3

Khomenko A.P., Solskaya I.Y. The project approach to preparation of transport engineers // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 134-138.

Целью инновационного к образованию является развитие методологии и методики обучения специалистов в рамках формирования проектных групп специалистов, участвующих в выполнении масштабных проектов развития транспорта в Восточной Сибири и Прибайкалье. Для транспортной системы России основным результатом инновационного проекта, реализуемого в Иркутской государственном университете путей сообщения, станет создание условий для эффективной реализации инфраструктурных преобразований с использованием творческого потенциала формируемых проектных групп специалистов.

Илл. — 1. Табл. — 3. Библ. — 2 наим.

УДК 681.3:[001 +62+33]

Толстых О.Д., Гозбенко В.Е. Усиление эффективности обучения высшей математики в техническом вузе и организация самостоятельной работы студентов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 139-141.

В статье рассмотрены проблемы связанные с преподаванием Высшей математики в техническом ВУЗе. Показано, что рациональное построение лекционного курса, а также эффективная организация и контроль самостоятельной работы позволит студенту получить достаточно хорошие и прочные знания по математическим дисциплинам, а также приобрести необходимые инженеру навыки применения математического аппарата и вычислительной работы.

Библ. — 3 наим.

УДК 656

Степин А.Г. История геологических изысканий в районе северо-муйского тоннеля и проблемы его эксплуатации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 141-148.

В данной статье показана история геологических изысканий при построении Северо-Муйского тоннеля. В настоящее время тоннель построен и эксплуатируется в течение нескольких лет. В наследство эксплуатационникам досталась масса дефектов и недоделок которые также рассмотрены в данной статье.

Табл. — 2. Библ. — 3 наим.

УДК 681.3:[001+62+33]

Толстых О.Д., Гозбенко В.Е. Структура и содержание тестовой базы по классическим разделам и специальным главам высшей математики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007. - № 1.- С. 148-150.

С каждым годом вопросам тестирования уделяется все больше внимания. Системы тестирования глубоко внедряются в процесс обучения в школах, колледжах, лицеях, гимназиях, вузах. В связи с этим на первый план выходит задача о структуре и содержании тестовой базы. В статье рассмотрены основные моменты связанные с построением тестовой базы по Высшей математики. Проведенный анализ позволил выделить первоочередные задачи при создании банка тестовых заданий.

Табл. — 1.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Арбатская Наталья Анатольевна,
ст. бухгалтер РЦС Красноярской железной дороги.

Бардушко Валерий Данилович,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой электроснабжениежелезнодорожного транспорта ИрГУПС

Белокобыльский Сергей Владимирович,
д.т.н., профессор, ректор БрГУ (г. Братск)

Белых Светлана Андреевна,
к.т.н., доцент БрГУ (г. Братск)

Бурашников Андрей Александрович,
инженер БрГУ (г. Братск)

Быкова Наталья Михайловна,
зав. кафедрой «Мосты и транспортные тоннели» ИрГУПС

Воложанина Олеся Александровна,
аспирант БГУЭП

Гозбенко Валерий Ерофеевич,
д.т.н., профессор ИрГУПС

Дамбаев Жаргал Гамбоевич,
д.т.н., профессор УУИЖТ (ИрГУПС) (г. Улан-Удэ)

Демьянов Вячеслав Владимирович,
к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» ИрГУПС

Домбровский Юрий Павлович,
аспирант кафедры МТТ, ИрГУПС

Елисеев Сергей Викторович,
д.т.н., профессор, исполнительный директор НИИ Современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС

Зайнагабдинов Дамир Альффидович,
студент ИрГУПС

Закарюкин Валерий Пантелеймонович,
к.т.н., доцент ИрГУПС

Засядко Анатолий Алексеевич,
к.т.н., доцент, зам. первого проректора ИрГУПС

Зиновьев Александр Александрович,
к.т.н., доцент БрГУ (г. Братск)

Исайкин Александр Сергеевич,
сотр. НПО "Инжстройсервис" (г. Москва)

Китов Борис Иванович,
д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой ТПМ ИрГУПС

Ковенькин Дмитрий Александрович,
к.т.н., ассистент кафедры ППХ, ИрГУПС

Комогорцев Максим Геннадьевич,
аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» ИрГУПС

Краковская Татьяна Алексеевна,
к.т.н., доцент факультета сервиса и рекламы Иркутского госуниверситета

Краковский Юрий Мечеславович,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Информационная безопасность» ИрГУПС

Крюков Андрей Васильевич,
д.т.н., профессор ИрГУПС

Кузнецов Николай Константинович,
д.т.н., профессор ИрГТУ (г. Иркутск)

Ливенцев Евгений Александрович,
ассистент кафедры ППХ, ИрГУПС

Логунов Александр Сергеевич,
аспирант ИрГУПС

Лонцих Павел Абрамович,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой механики и управления качеством ИрГТУ

Люблинский Валерий Аркадьевич,
к.т.н., профессор, проректор БрГУ (г. Братск)

Марынич Дмитрий Степанович,
студент ЗабИЖТ

Марюхненко Виктор Сергеевич,
к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» ИрГУПС

Моргунов Александр Николаевич,
к.т.н., доцент МГСУ (г. Москва)

Мухачев Юрий Сергеевич,
к.т.н., доцент ИрГУПС

Новосельцев Виктор Петрович,
к.т.н., доцент УУИЖТ (ИрГУПС) (г. Улан-Удэ)

Новосельцев Петр Викторович,
к.т.н., зав. лабораторией УУИЖТ (ИрГУПС) (г. Улан-Удэ)

Носков Сергей Иванович,
д.т.н., профессор, директор института информационных технологий ИрГУПС

Орловский Сергей Николаевич,
к.т.н., доцент кафедры Проектирования лесного оборудования Сибирского государственного технологического университета (г. Красноярск)

Печенкина Вера Викторовна,
д.э.н., профессор кафедры Экономики и предпринимательства в строительстве Сибирского федерального университета (г. Красноярск)

Рябов Евгений Валерьевич,
ст. преподаватель ИрГУПС

Свитачев Анатолий Иванович,
д.т.н., доцент, зав. кафедрой Общематематических и естественно-научных дисциплин КрИЖТ (ИрГУПС) (г. Красноярск)

Синеговская Татьяна Сергеевна,
к.ф.-м. н., доцент кафедры «Высшая математика», ИрГУПС

Ситов Илья Сергеевич,
аспирант БрГУ (г. Братск)

Соколов Виталий Юрьевич,
аспирант ИрГУПС

Соколова Ольга Владимировна,
к.т.н, доцент ЗабИЖТ (г. Чита)

Сольская Ирина Юрьевна,
д.э.н., профессор, директор института ДПО ИрГУПС

Степин Алексей Гаврилович,
сотрудник ВСЖД

Толстых Ольга Дмитриевна,
к.ф.-м.н., доцент ИрГУПС

Тюрнев Александр Сергеевич,
аспирант БГУЭП (г. Иркутск)

Упырь Роман Юрьевич,
аспирант ИрГУПС

Хоменко Андрей Павлович,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой Высшей математики, Ген. Директор НИИ Современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС

Министерство Образования и Науки Российской Федерации

Министерство Транспорта
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

№1(13)
2007

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»: 73693
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, ул. Чернышевского, 15.

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, ул. Чернышевского, 15)