МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ

ВІСНИК

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Випуск 3

Дніпропетровськ
2004

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

В І С Н И К

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Випуск 3

Дніпропетровськ
2004

ББК 39.2
В53
УДК 625.1+626.2

Редакційна колегія:

Головний редактор д-р техн. наук *Пшінько О. М.*
Члени редколегії: д-ри техн. наук *Біляєв М. М.*, *Блохін Є. П.*, *Боднар Б. Є.*, *Босов А. А.*, *Браташ В. О.*, *Гетьман Г. К.*, *Данілєнко Е. І.*, *Доманський В. Т.*, *Дубинець Л. В.*, *Жуковицький І. В.*, *Загарій Г. І.*, *Казакевич М. І.*, *Коротенко М. Л.*, *Костін М. О.*, *Петренко В. Д.*, *Пунагін В. М.*, *Рибкін В. В.*, *Разгонов А. П.*, *Савчук О. М.*, *Хандецький В. С.*, *Шафіт Є. М.*;
д-ри фіз.-мат. наук *Гаврилюк В. І.*, *Кравець В. В.*;
д-ри хім. наук *Плахотнік В. М.*, *Фєдін О. В.*;
д-ри екон. наук *Бабіч В. П.*, *Драгун Л. М.*, *Зайцева Л. М.*, *Крамаренко В. Д.*, *Кулаєв Ю. Ф.*, *Покотілов А. А.*
Відповідальний секретар канд. техн. наук *Корженевич І. П.*

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 7704. Видане Державним комітетом телебачення і радіомовлення України 08.08.2003 р.

Друкується за рішенням вченої ради Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна від 28.01.04, протокол № 6

Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка
В53 В. Лазаряна. – Вип. 3. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 175 с.

У статтях наведені наукові дослідження, виконані авторами в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та інших організаціях. Статті присвячені вирішенню актуальних питань залізничного транспорту за такими напрямками: автоматизовані системи керування, екологія на транспорті, економіка транспорту, електричний транспорт, залізнична колія, моделювання задач транспорту та екології, ремонт та експлуатація засобів транспорту, рухомий склад і тяга поїздів, транспортне будівництво.

Вісник становить інтерес для працівників науково-дослідних організацій, викладачів вищих навчальних закладів, докторантів, аспірантів, магістрантів та інженерно-технічних працівників.

В статьях отражены научные исследования, выполненные авторами в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна и других организациях. Статьи посвящены решению актуальных вопросов железнодорожного транспорта по следующим направлениям: автоматизированные системы управления, экология на транспорте, экономика транспорта, электрический транспорт, железнодорожный путь, моделирование задач транспорта и экологии, ремонт и эксплуатация транспортных средств, подвижной состав и тяга поездов, транспортное строительство.

Вестник представляет интерес для работников научно-исследовательских организаций, преподавателей высших учебных заведений, докторантов, аспирантов, магистрантов и инженерно-технических работников.

ББК 39.2

© Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004

ЗМІСТ

ГАЛУЗЬ ТЕХНІЧНИХ НАУК

РОЗДІЛ «АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ТРАНСПОРТІ»

А. В. АНДРЕЕВ, В. В. БЕЗРУКОВ, В. И. ГАВРИЛЮК, В. Я. КИЗЯКОВ (ДИИТ)
КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И СВЯЗИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА 6

А. В. АНДРЕЕВСКИХ (ДИИТ)
МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ НА ЭЛЕМЕНТАХ ПАМЯТИ С СУЩЕСТВЕННЫМИ
НЕЛИНЕЙНЫМИ ЗАДЕРЖКАМИ 11

Т. Н. СЕРДЮК, В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ)
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КОДОВОГО ТОКА В РЕЛЬСАХ 15

JERZY MIKULSKI, JAKUB MŁYŃCZAK (Instytut Transportu, Politechnika Śląska, Poland)
DIAGNOSTICS OF POINTS DRIVE WITH PLC CONTROLLER APPLICATION 21

РОЗДІЛ «ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ»

Н. Н. БЕЛЯЕВ, Ю. Н. ЧИГРИНСКАЯ, Р. В. ВАРЧЕНКО (ДИИТ)
ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ 26

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО, В. Н. ПЛАХОТНИК (ДІІТ)
КИНЕТИКА МИГРАЦИИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ЧЕРЕЗ ГРУНТЫ
ВО ВРЕМЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЛИВОВ И ТРАНСПОРТНЫХ АВАРИЙ 30

РОЗДІЛ «ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ»

В. І. БОРЩОВ, М. К. ЖУРБЕНКО, А. П. ТРЯКІН (ДІІТ)
ПОПЕРЕЧНІ СИЛИ В РЕЙКАХ КОЛІЇ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС РУХУ ПОЇЗДІВ
ПО ПРОГІННИХ БУДОВАХ ТИПУ 690/7К 34

М. Б. КУРГАН (ДІІТ)
ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ПЕРЕБУДОВІ ДІЛЯНКИ ЗАЛІЗНИЦІ
ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ШВИДКІСНОГО РУХУ ПОЇЗДІВ 37

И. ПОВИЛАЙТЕНЕ, К. САКАЛАУСКАС, И. ПОДАГЕЛИС
(Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва)
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В КРИВЫХ
НА БОКОВОЙ ИЗНОС НАРУЖНОГО РЕЛЬСА 46

РОЗДІЛ «МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОЛОГІЇ»

А. А. БОСОВ, В. М. ИЛЬМАН (ДИИТ)
ДИНАМИКА КАЧЕНИЯ ТЕЛА ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ 50

А. А. БОСОВ (ДИИТ), Г. Н. КОДОЛА (УГХТУ)
ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДОРОГ УКРАИНЫ И УКРЗАЛІЗНИЦІ В ЦЕЛОМ
ЗА ПЕРИОД 1991–2001 ГГ. 56

А. А. БОСОВ, Н. А. МУХИНА (ДИИТ)
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ В СТРУКТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ 60

Г. В. ЕВДОМАХА, Ю. Н. ИВЧЕНКО, В. В. СКАЛОЗУБ, К. Г. ЖЕЛЕЗНОВ, В. А. ЛИТВИН, А. П. ИВАНОВ (ДИИТ)
РЕЖИМЫ ВЕДЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ И ПЕРЕМЕННЫХ ТАРИФОВ ОПЛАТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 65

Н. І. ПОСЛАЙКО (ДІІТ)
ОБЧИСЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ОБСЛУГОВУЮЧИХ ПРИЛАДІВ У СИСТЕМАХ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, НЕОДНОРІДНИХ ЗА ЧАСОМ 74

РОЗДІЛ «РЕМОНТ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ»

Г. Н. КИРПА (Министерство транспорта Украины)
ВЫБОР МИНИМАЛЬНОГО РАДИУСА КРИВЫХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ 78

Б. П. ПІХ (Львівська залізниця), І. П. КОРЖЕНЕВИЧ, М. Б. КУРГАН (ДІІТ)
ВИКОРИСТАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З РОЗСУВНИМИ КОЛІСНИМИ ПАРАМИ НА НАПРЯМКУ КИЇВ–ЛЬВІВ–МОСТИСЬКА II 82

РОЗДІЛ «РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ»

В. Д. ДАНОВИЧ, В. В. РЫБКИН, А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, Н. В. ХАЛИПОВА, А. П. ТРЯКИН (ДИИТ)
К ВОПРОСУ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ ВКАТЫВАНИЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС ДЛЯ ПОРОЖНИХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ 90

РОЗДІЛ «ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО»

В. І. БОРЩОВ (ДІІТ)
ДО ПИТАННЯ ПРО СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ШТУЧНИХ СПОРУД ЗАЛІЗНИЦІ 97

В. І. БОРЩОВ, М. К. ЖУРБЕНКО, Б. Д. СУХОРУКОВ (ДІІТ)
ДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННННЯ ПРОГІННОЇ БУДОВИ ТИПУ 690/7К 103

В. Г. ВИКТОРОВ, Е. А. ДАНИЛОВ, Т. П. РЕШЕТНЯК (ДИИТ)
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ МАТЕРИАЛОВ СТАРОГО И НОВОГО БЕТОНА 111

В. Е. ВОЛКОВА (ДИИТ)
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ 115

С. А. ГРИШЕЧКІН, Д. І. ДЯДЮШКІН (ДІІТ)
НЕРУЙНІВНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В ДИСПЕРСНИХ ГРУНТАХ 121

Б. Г. КЛОЧКО (ДИИТ), А. А. КУШВИД (строительная компания «Регион»)
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ 124

А. К. БУГАЕВ (Укрзалізниця), С. В. ЦЕПАК, А. Л. ТЮТЬКИН (ДИИТ)
АРМИРОВАНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА КАК СПОСОБ ЕГО РАБОТЫ В СТАДИИ УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ 127

Т. В. МАМОНОВА (ДИИТ)
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НАПОЛНЕННЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ АЛКИЛРЕЗОРЦИНОВ 130

В. В. МАРОЧКА (ДІІТ)
УРАХУВАННЯ ГІДРОМЕХАНІКИ ДЕМПФЕРІВ ПРИ ГАСІННІ КОЛИВАНЬ ПРОГІННИХ БУДОВ МОСТІВ 134

В. И. ПЕТРЕНКО (ОАО «Киевметрострой»), В. Д. ПЕТРЕНКО, А. Л. ТЮТЬКИН (ДИИТ)
ПРИМЕНЕНИЕ «ФИЛЬТРОВ» ДЛЯ УГЛУБЛЕННОГО АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ «КРЕПЬ-МАССИВ» В РАСЧЕТАХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ 137

О. М. ПШІНЬКО, О. В. ГРОМОВА (ДІІТ)
БЕТОНИ З ПІДВИЩЕНИМИ АДГЕЗІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ РЕМОНТУ ШТУЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД 141

А. Н. ПШИНЬКО, А. В. КРАСНЮК, Е. С. ХАРЧЕНКО (ДИИТ)
ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ КАРБАМИДНЫХ СМОЛ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ 146

Н. Н. РУДЕНКО (ВНУ), Д. В. РУДЕНКО (ДИИТ), В. В. ПУНАГИН (ПГАСА)
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АКТИВИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ БЕТОНА 150

К. И. СОЛДАТОВ, Г. С. ЖЕЛЕЗНЯК (ДИИТ), К. В. ГУРЖИЙ («Сервисстрой», Ростов-на-Дону),
О ЖЕСТКОСТИ ОПОР РЕАЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ 154

К. І. СОЛДАТОВ, А. Г. КРЮК (ДІІТ)
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ РОБОТИ МЕТАЛЕВОГО АРОЧНОГО МОСТА ЧЕРЕЗ Р. СТАРИЙ ДНІПРО У МІСТІ ЗАПОРІЖЖЯ 16**1**

К. И. СОЛДАТОВ (ДИИТ), В. И. МАДАТОВ (корпорация «Промстальконструкция»)
О СРОКЕ СЛУЖБЫ МАЛЫХ И СРЕДНИХ МОСТОВ НА ПЕРИФЕРИЙНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ 16**5**

О. Л. ТЮТЬКІН, І. М. ПЕТРЕНКО (ДІІТ)
ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИСКЛЕПІНЧАСТИХ СТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ СПЕЦИФІКИ ЇХ ПОВЕДІНКИ 171

УДК656.25: 621.318.5

А. В. АНДРЕЕВ, В. В. БЕЗРУКОВ, В. И. ГАВРИЛЮК, В. Я. КИЗЯКОВ (ДИИТ)

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА

У статті розглянуто можливість контролю та вимірювання параметрів ліній залізничної автоматики та зв'язку на основі методу ідентифікації, наведено математичне обгрунтування методу спектрального аналізу, розглянуто методи формування шумоподібного сигналу та можлива структура пристрою контролю та діагностування.

В статье рассмотрена возможность контроля и измерения параметров линий железнодорожной автоматики и связи на основе метода идентификации, приведено математическое обоснование метода спектрального анализа, рассмотрены методы формирования шумоподобного сигнала и возможная структура устройства контроля и диагностирования.

The article considers a possibility of controlling and measuring the parameters of railway automatics and communication lines on the basis of an identification method, provides a mathematical substantiation of the spectral analysis method, investigates the methods of noise-like signal generation and a possible structure of the device for control and diagnostics.

Введение

Железнодорожный транспортный комплекс представляет собой сложную территориально рассредоточенную систему с большим количеством технологических подразделений и технических систем управления процессом перевозок, организованных по принципу централизации диспетчерских служб. Надежная и эффективная работа железнодорожного транспорта во многом зависит от достоверности и своевременности передачи информации, которая на физическом уровне определяется качеством линий передачи. Для выявления отклонений параметров от нормативных линии периодически осматривают и контролируют основные параметры [1; 2]. Искажения при передаче гармонических сигналов в проводных линиях автоматики и связи характеризуют такими параметрами: собственное или рабочее затухание, относительные фазовые сдвиги, собственные (характеристические) и рабочие фазовые коэффициенты, абсолютное и относительное групповое время прохождения. Условия передачи многочастотных сигналов оценивают амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками [2].

Для контроля параметров линий связи цифровых телефонных станций типа SI-2000 на железных дорогах Украины применяют систему, которая позволяет электромеханику производить измерения соединительных линий (абонентских и между узлами телефонной станции) как в автоматическом, так и в ручном режимах. При этом контролируются напряжения переменного и постоянного тока, сопротивление изоляции, емкость между проводами и между проводами и землей.

Контроль линий связи между узлами осуществляется следующим образом. В ответ на запрос пользователя на проведение контроля измеряемый узел включает автоответчик, который передает контрольную частоту в сторону управляющего узла. В результате анализа ответа получают информацию о контролируемой линии [3].

Установка «Кросс-М» [4], применяемая для контроля линий связи, позволяет измерять напряжения: постоянного и переменного токов в диапазоне от 0,03 до 300 В при частотах от 20 до 200 Гц, токов в линии (тока вызова и тока шлейфа), сопротивления и емкости линии, сопротивления изоляции (в диапазоне от 1 до 500 МОм), уровня сигнала (в диапазоне от 0 до 30 дБ), псофометрического шума (от 1 до 100 мВ), асимметрии линии и др. Установка состоит из двух блоков – измерительного и коммутационного, которые подключаются к контролируемым линиям и персональному компьютеру.

Недостатком существующих устройств для контроля параметров линий железнодорожной автоматики и связи является недостаточное количество измеряемых параметров в автоматическом режиме, возможность проведения измерений только в свободных линиях (т. е. в технологические окна), что затрудняет своевременное выявление деградации параметров линий связи ниже допустимого уровня.

Рассмотренные недостатки можно устра-

нить при применении для контроля параметров линий шумоподобного сигнала [7–10]. Метод позволяет проводить контроль и диагностирование линий непрерывно в процессе их работы с измерением амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик.

Цель и задачи исследований

Целью настоящей работы является разработка автоматического устройства для контроля и диагностирования линий связи и автоматики с применением шумоподобного сигнала.

Для достижения поставленной цели рассмотрена возможность контроля и измерения параметров линии на основе метода идентификации, приведено математическое обоснование метода спектрального анализа, рассмотрены методы формирования шумоподобного сигнала и возможные способы организации устройства контроля и диагностирования линий железнодорожной автоматики и связи.

Контроль параметров объекта на основе метода идентификации.

Методы контроля и измерения параметров объектов, основанные на применении теории идентификации объектов, обычно разделяют на два вида.

Первый метод основан на анализе отклика объекта на воздействие рабочего сигнала в процессе его функционирования [7].

Во втором методе измерения проводят на основе анализа отклика объекта на воздействие тестирующего сигнала. В зависимости от вида тестового сигнала различают частотный и временной способы идентификации.

Структурная схема устройства, реализованного по первому методу идентификации, приведена на рис. 1.

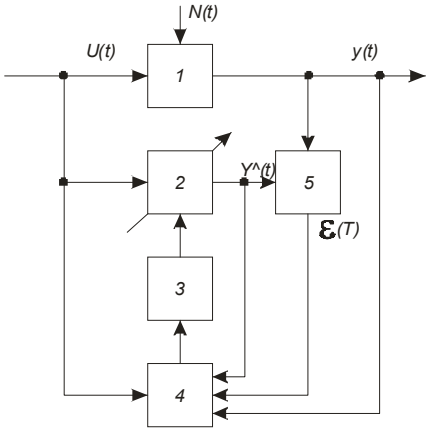


Рис. 1. Устройство идентификации на основе анализа отклика объекта на рабочие сигналы:
1 – объект контроля; *2* – модель; *3* – блок обработки сигналов; *4* – измерительное устройство; *5* – вычитающее устройство

Работа устройства происходит следующим образом. Входной сигнал $u(t)$ подается на объект измерения и на модель, которая является настраиваемой. Сигналы с выхода объекта контроля $y(t)$ и модели поступают на вычитающее устройство, с выхода которого разностный сигнал $\varepsilon(t)$ поступает на измерительное устройство и устройство обработки информации. Управляющий сигнал с блока обработки информации изменяет параметры модели до тех пор, пока разностный сигнал не станет равным нулю. В результате формируется модель идентичная объекту, что позволяет определить контролируемые параметры.

При измерениях частотных характеристик тестирующим сигналом на вход объекта подают заданный сигнал (обычно гармонический) и измеряют параметры выходного сигнала.

При измерениях временных характеристик тестирующим сигналом на вход объекта подают ступенчатый сигнал (идентификация по переходной характеристике) или импульсный сигнал (идентификация по импульсной характеристике) и анализируют выходной сигнал.

Математическое обоснование метода контроля линий автоматики и связи с применением ШПС

Сигнал $y(t)$ на выходе объекта контроля можно записать через входной сигнал $u(t)$ и импульсную характеристику объекта $g(\theta)$ в таком виде:

$$Y(t) = \int_0^\infty g(\theta)u(t-\theta)d\theta\,. \qquad (1)$$

При наложении на $y(t)$ шума $n(t)$ сигнал на входе линии будет иметь вид

$$z(t) = y(t) + n(t)\,, \qquad (2)$$

где $n(t)$ – центрированный шум, т. е. стационарный случайный сигнал с нулевым математическим ожиданием.

Корреляционная функция входного и выходного сигналов объекта идентификации имеет вид

$$R_{uz}(\tau) = E\{u(t-\tau)z(t)\} = \int_0^\infty E\{u(t-\tau)u(t-\theta)\}g(\theta)d(\theta) + E\{n(t)u(t-\tau)\}\,. \qquad (3)$$

Выражение (3) можно упростить благодаря независимости сигнала $u(t)$ от шума $n(t)$ следующим образом:

$$E\{n(t)u(t-\tau)\} = E\{n(t)\}E\{u(t-\tau)\} = 0\,. \quad (4)$$

Кроме того

$$E\{u(t-\tau)\cdot u(t-\theta)\} = R_{uu}(\tau-\theta), \quad (5)$$

где $R_{uu}(\tau-\theta)$ – автокорреляционная функция сигнала $u(t)$, который считается стационарным случайным процессом.

Выражение (3) с учетом равенств (4) и (5) примет вид

$$R_{uz}(\tau) = \int_0^\infty R_{uu}(\tau-\theta)g(\theta)d\theta = R_{uy}(\tau). \quad (6)$$

Это выражение известно как уравнение Винера-Хопфа.

Если идентификационный сигнал $u(t)$ является белым шумом с мощностью σ^2, то

$$R_{uu}(\tau-\theta) = \sigma^2\delta(\tau-\theta). \quad (7)$$

Откуда

$$R_{uz}(\tau) = \int_0^\infty \sigma^2\delta(\tau-\theta)g(\theta)d\theta = \sigma_k^2 g(\tau). \quad (8)$$

Взяв интеграл Фурье от обеих частей выражения (3), получим

$$\dot{S}_{xy}(\omega) = S_{xx}(\omega)\dot{W}(\omega), \quad (9)$$

где $\dot{S}_{xy}(\omega)$ – односторонняя спектральная плотность мощности выходного сигнала $y(t)$; $S_{xx}(\omega)$ – односторонняя спектральная плотность мощности тестируемого сигнала $x(t)$.

Из выражения (9) получим

$$\dot{W}(\omega) = \dot{S}_{xy}(\omega)/S_{xx}(\omega). \quad (10)$$

Спектральная плотность белого шума $S_{xx}(\omega)$, используемого в данном методе для идентификации, постоянна по всей частотной области. В результате из выражения (10) получаем, что взаимно спектральная плотность $S_{xy}(\omega)$ с точностью до постоянного множителя соответствует частотной передаточной функции идентифицируемого объекта.

На практике метод удобно реализовать на основе следующих выражений:

$$\dot{W}(f_k) = \dot{S}_{xy}(f_k)/\dot{S}_{xx}(f_k),\ f_k = kf_1; \quad (11)$$

$$\dot{S}_{xy}(f_k) = \frac{2}{NT}X^*(f_k)\cdot Y(f_k); \quad (12)$$

$$\dot{S}_{xx}(f_k) = \frac{2}{NT}X^*(f_k)\cdot X(f_k); \quad (13)$$

$$X(f_k) = T\sum_{n=0}^{N-1} x(nT)\cdot\exp(-j2\pi kn/N); \quad (14)$$

$$Y(f_k) = T\sum_{n=0}^{N-1} y(nT)\cdot\exp(-j2\pi kn/N), \quad (15)$$

где $S_{xy}(f_x)$ и $S_{xx}(f_x)$ – односторонние спектральные плотности; $X(f_k)$ и $Y(f_k)$ – дискретные спектры функций $x(nT)$ и $y(nT)$ на периоде NT, полученные прямым ДПФ; $f_k = k f_1$ – k-я гармоника дискретной частоты; $f_1 = 1/NT = F/N$ – основная частота (1-я гармоника); F – частота дискретизации.

Если спектр $S_{xx}(f_x)$ сигнала $x(nT)$ достаточно широкополосный так, что в полосе пропускания объекта $S_{xx}(f_x) = \text{const}$, то операция деления в выражении для передаточной функции сводится к изменению масштаба.

На основе полученной дискретной передаточной функции объекта измерения можно получить его частотные и временные характеристики.

Структурная схема устройства контроля линий

Структурная схема устройства контроля и диагностирования линий связи и железнодорожной автоматики с использованием для тестирования шумоподобного сигнала приведена на рис. 2.

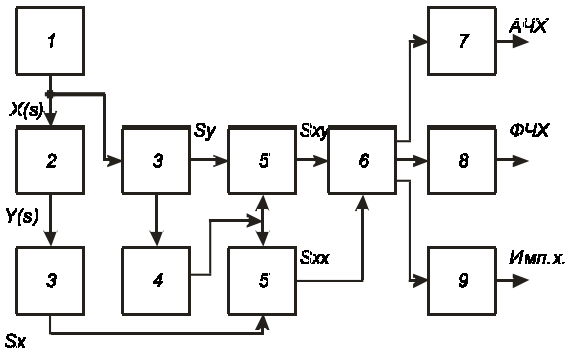


Рис. 2. Структурная схема устройства контроля линий с использованием шумоподобного сигнала: *1* – генератор шумоподобного сигнала; *2* – объект измерения; *3* – блок дискретного преобразования Фурье; *4* – блок вычисления сопряженного значения комплексного числа; *5* – блок умножения; *6* – делитель; *7* – блок вычисления модуля комплексного числа; *8* – блок вычисления аргумента; *9* – блок обратного дискретного преобразования Фурье

Устройство работает следующим образом. Сигнал $X(s)$ поступает в от генератора *1* на вход объекта контроля, на выходе которого появляется сигнал $Y(s)$. При этом на выходе блока *3* получаем значение дискретных спектров входного S_x и выходного S_y сигналов. С выходов умножителей получаем спектральную плотность входного S_{xx} и выходного S_{xy} сигналов, а на выходе блока *6* – дискретную передаточную функцию $W(s)$.

Для получения передаточной функции необходимо воспользоваться дискретным преобразованием Фурье, при помощи которого получаем спектр сигнала. По спектрам входного и выходного сигналов получим спектральную плотность мощности сигнала S_{xy}, S_{xx}. Для получения передаточной функцию объекта измерения достаточно разделить спектральную плотность мощности выходного сигнала на спектральную плотность мощности входного сигнала.

Принцип формирования шумоподобного сигнала

Шумоподобный сигнал формируется на основе псевдослучайной последовательности, которая генерируется при помощи циклически сдвигаемого регистра. Зависимости количества ячеек и номера формирующих элементов регистра от длины формируемой псевдослучайной последовательности приведены в табл. 1 и 2 [4].

Таблица 1

Зависимость количества ячеек регистра от длины псевдослучайной последовательности

Количество ячеек регистра	8	9	10	11	12	13
Длина псевдослучайной последовательности	256	512	1024	2048	4096	8192

Таблица 2

Выбор номера функционального элемента от количества ячеек регистра

Количество ячеек регистра	8	9	10	11	12	13
Номер функционального элемента	2; 3; 4; 8	4; 9	3; 10	2; 9	1; 4; 6; 12	1; 3; 4; 13

При реализации генератора ШПС была выбрана псевдослучайная последовательность длиною в 512 элементов. В соответствии с табл. 1 и 2 получим, что при этом должно быть 9 ячеек регистра, а номера функциональных элементов равны 4 и 9.

Структурная схема генератора псевдослучайной последовательности длиною 512 элементов приведена на рис. 3.

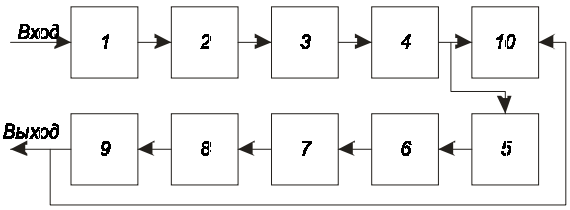


Рис. 3. Структурная схема генератора псевдослучайной последовательности длиной 512 элементов: *1–9* – ячейки регистра сдвига; *10* – сумматор

Сформированная псевдослучайная последовательность обладает следующими характеристиками:

- вероятность появления логического нуля (единицы) – 50 %;
- условная вероятность появления логического нуля после нуля – 50 %;
- условная вероятность появления единицы после единицы – 50 %;
- энтропия сигнала – 1.

Структура устройства контроля

При централизованной организации информационно-управляющих систем на железнодорожном транспорте естественным является размещение аппаратуры контроля и диагностирования на центральном посту. При этом возможны два способа подачи тестирующего сигнала на контролируемую линию.

При первом способе тестирующий сигнал подается в линию со стороны линейного пункта после получении запроса на проведение контроля с центрального пункта.

При втором способе тестирующий сигнал подается со стороны центрального пункта, на котором размещается измерительная аппаратура.

Рассмотрим структуру системы контроля для этих двух случаев.

Первый способ. В ответ на пришедший с центрального поста сигнал запроса на проведение контроля аппаратура линейного пункта начинает генерировать в линию тестирующий сигнал. Для синхронизации аппаратуры на приемном и передающем концах линии используется старт-стопный метод.

Структурная схема генератора линейного пункта, вырабатывающая тестирующий шумоподобный сигнал, показана на рис. 4.

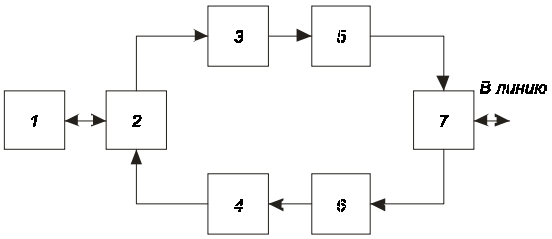


Рис. 4. Структурная схема генератора шумоподобного сигнала:
1 – микроконтроллер; *2* – программируемый интерфейс; *3* – цифро-аналоговый преобразователь; *4* – аналого-цифровой преобразователь; *5* – устройство согласование для цифро-аналогового преобразователя; *6* – устройство согласования для аналого-цифрового преобразователя; *7* – модем

Второй способ. Структурная схема системы контроля приведена на рис. 5.

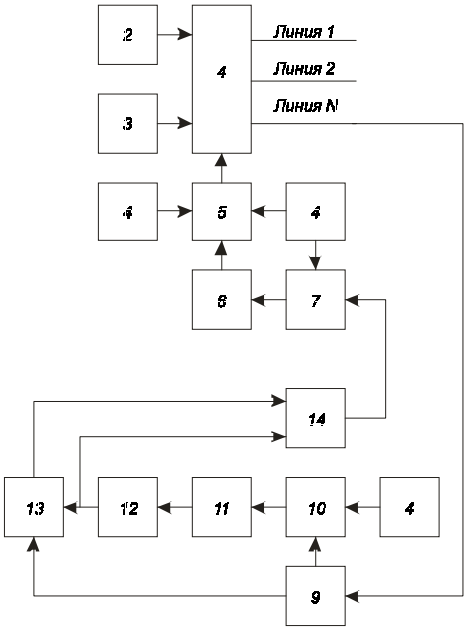


Рис. 5. Структурная схема коммутирующего устройства:
1 – устройство согласования с объектом контроля; *2* – блок измерения параметров; *3* – генератор псевдослучайной последовательности импульсов (шумоподобного сигнала); *4* – программируемые коммутаторы; *5* – блок управления; *6* – оперативное запоминающее устройство; *7* – анализатор псевдослучайной последовательности; *8* – устройство организации шлейфа; *9* – регистр прямого направления; *10* – анализатор псевдослучайной последовательности; *11* – запоминающее устройство; *12* – ключ; *13* – модель (искусственная линия); *14* – регистр обратного направления

При проведении контроля выводы линии со стороны линейного пункта необходимо замыкать, для чего используются управляемые ключи. Анализатор псевдослучайной последовательности, как и генератор, строится на основе регистров сдвига. При совпадении адресной части измерительного сигнала, анализатор псевдослучайной последовательности формирует шлейф при помощи ключа *12* и искусственной линии *13*. При этом имеется возможность перенаправить измерительный сигнал обратно на передающий конец линии и измерить его параметры.

Выводы

С целью разработки автоматического устройства для контроля и диагностирования линий связи и автоматики с применением шумоподобного сигнала, рассмотрена возможность контроля и измерения параметров линии на основе метода идентификации, приведено математическое обоснование метода спектрального анализа, рассмотрены методы формирования шумоподобного сигнала и возможные способы организации устройства контроля на этой основе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) (ЦШЕОТ 0012). – К., 1998.
2. Дмитренко И. Е., Сапожников В. В., Дьяков Д. В. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханіки и святи. – М.: Транспорт, 1994.
3. SI2000 цифровая коммутационная система CS5051AA Версия 5. Справочник по эксплуатации. Документационный центр, Крань, 1998.
4. Пат. 95125424 Украина, МКИ НО4М 47/28. Устройство телеконтроля линий передачи цифровой информации: Пат. 95125424 Украина, МКИ НО4М 47/28; Мозель А. Г., Продан А. С., Чайников С. Л.; Заявл. 9.04.96; Опубл. 30.03.98; – 6 с.
5. Пат. 98031084 Украина, МКИ НО4М 47/28. Цифровое испытательно-измерительное устройство линий АТС: Пат. 98031084 Украина, МКИ НО4М 47/28; Денисенко В. П., Леонтьев О. П., Долинский В., Семотюк М. В. Заявл. 5.08.96; Опубл. 2.09.98; – 5 с.
6. Резников А. ШПС – эволюция или революция? // Радио. 1998. № 3. – С. 15–17.
7. Бессонов А. А. Методы и средства идентификации динамических объектов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
8. Гаврилюк В. И., Безруков В. В., Бондаренко Ю. А. Применение шумоподобного сигнала для идентификации и измерения параметров проводных линий связи // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. № 4. – С. 15–19.
9. Гаврилюк В. И., Безруков В. В., Бондаренко Ю. А. Корреляционный метод определения частотных параметров четырехполюсника с использованием шумоподобного сигнала // Інформаційно-керуючі системи на залізнич-ному транспорті. – 2002. № 4, 5. – С. 48–49.
10. Gavrilyuk V., Bezrukov V., Bondarenko Yu. Using of a noise-like signal for measurements of frequency parameters of wire telecommunications lines.

Поступила в редколлегию 27.01.04.

УДК 656.25:681.32

А. В. АНДРЕЕВСКИХ (ДИИТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ НА ЭЛЕМЕНТАХ ПАМЯТИ С СУЩЕСТВЕННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ЗАДЕРЖКАМИ

Запропоновано комп'ютерний метод моделювання пристроїв автоматики, побудованих на елементах пам'яті з суттєвими нелінійними затримками як з фіксацією впливу, так і без фіксації впливу. При моделюванні елементів пам'яті, виконаних на електромагнітних приладах, запам'ятовуючих попередній вплив, запропоновано застосовувати багатотактну схему заміщення. Залежно від потрібної точності у моделі на один елемент пам'яті може бути використано до чотирьох каналів затримки з різноманітною кількістю однотактних логічних елементів пам'яті й один внутрішній елемент пам'яті на J-K тригері. Запропоновані вирази, які визначають вихідні сигнали моделі з урахуванням часу реакції на вхідний вплив і на комутацію виконуючих кіл, наведено приклад.

Предложен компьютерный метод моделирования устройств автоматики, построенных на элементах памяти с существенными нелинейными задержками как с фиксацией воздействия, так и без фиксации воздействия. При моделировании элементов памяти, выполненных на электромагнитных приборах, запоминающих предыдущее воздействие, предложено применять многотактную схему замещения. В зависимости от требуемой точности в модели на один элемент памяти может быть использовано до четырех каналов задержки с различным количеством однотактных логических элементов памяти и один внутренний элемент памяти на J-K триггере. Представлены выражения, определяющие выходные сигналы модели с учетом времени реакции на входное воздействие и на коммутацию исполнительной цепи, приведен пример.

The paper proposes a computer method of modelling automatic devices, based on the memory elements with essential nonlinear delays, both with and without fixation of influence. In the procedure of memory elements modelling, performed on electromagnetic devices, remembering the previous influence, it is proposed to use a multi-cycle substitution scheme. Depending on the required accuracy, the model can use up to four delay channels with different number of single-cycle logic elements of memory per one memory element, and one internal memory element, based on a J-K trigger. The expressions have been provided, determining the model's output signals, with account of the time of reaction upon the input influence and upon the commutation of executive circuit. The findings have been illustrated by an example.

При исследовании дискретных устройств АТС и энергоснабжения, содержащих элементы памяти с длительным временем хранения информации, выполненных на электромагнитных приборах, запоминающих предыдущее воздействие, возникают проблемы в аналитическом описании их функционирования и программной реализации временных стохастических параметров. Вследствие этого усложняются задачи анализа, синтеза и диагностирования систем автоматики и телемеханики с целью оптимизации их структур и повышения эффективности и безопасности функционирования.

Существует значительное количество математических аппаратов и программных пакетов, позволяющих производить компьютерное моделирование дискретных и непрерывных устройств в режиме real-time.

Применение универсального и сложного аппарата имитационного моделирования типа сетей Петри, F-сети, E-сети и сети Мерлина [1] целесообразно только для моделирования вычислительных процессов или устройств, а в данном случае связано с большими затратами времени и средств.

Моделирование может выполняться на уровне динамических дискретных автоматов [2], но здесь невозможно описать функционирование непрерывно-дискретного автомата.

Анализ типовых пакетов MatLab, OrCad, VHLD, Electronic Workbench показал, что у них имеется ряд недостатков, которые усложняют процесс моделирования устройств железнодорожной автоматики на ПЭВМ:

- необходимо индивидуально проектировать необходимые компоненты для моделирования;
- ограничена возможность регулирования скорости протекания процесса моделирования, сложно учесть существенные задержки в работе элементов памяти;

- значительное количество не нужных функций, занимающих большой объем памяти ПК;
- нет возможности работы с внешними устройствами ввода-вывода аналогового сигнала кроме, как работы с программатором через внешние порты;
- высокая стоимость лицензированных пакетов и отсутствие исходных продуктов для возможности подключения собственных драйверов устройств.

Необходим более доступный и специализированный метод моделирования, ориентированный на решение практических задач по совершенствованию существующих и разработке новых систем АТС и релейной защиты на железнодорожном транспорте.

Целью данной работы является создание универсальной модели дискретного устройства на элементах памяти (ЭП) различного принципа действия с существенными нелинейными задержками. В частности, представляется целесообразным для компьютерного моделирования элементов памяти с фиксацией воздействия за основу взять модель [3; 4], используемую при моделировании ЭП без фиксации воздействия, преобразовав ее в двухвходовую.

Обозначим сокращенно такой элемент памяти ЭПФ. Если этот элемент памяти имеет различные задержки на входные воздействия соответственно τ_1 и τ_2, то при выбранном шаге моделирования τ_m количество типовых однотактных элементов памяти ЭПЛ в каналах задержки включения (КЗВ) и отключения (КЗО) составит соответственно:

$$i = \text{integer}\left(\tau_1 / \tau_m\right), \quad j = \text{integer}\left(\tau_2 / \tau_m\right).$$

Преобразование информации в канале КЗВ будет происходить в соответствии с выражением

$$x_i(t) = x_n(t)x_n(t-1)\ldots x_n(t-i) = \prod_{i=0}^{i} x_n(t-i). \quad (1)$$

По аналогии в канале КЗО:

$$x_j(t) = x_p(t)x_p(t-1)\ldots x_p(t-j) = \prod_{j=0}^{j} x_p(t-j). \quad (2)$$

В соответствии с правилами работы $J-K$ триггера выходной сигнал модели ЭПФ:

$$y(t) = \bar{x}_j(t)y(t-1) \vee x_i(t)\overline{y}\,(t-1). \quad (3)$$

В частности, если множества $x_n(t)$ и $x_p(t)$ не пересекаются, то для булевых функций, когда t, i, j – положительные целые числа, правомерно тождество:

$$x_j(t)\bar{x}_j(t) = x_j(t)$$

или

$$\prod_{i=0}^{i} x_n(t-i) \sum_{j=0}^{j} \bar{x}_p(t-j) = \prod_{i=0}^{i} x_n(t-i). \quad (4)$$

Следовательно, в этом случае из выражений (3) и (4) получим упрощенное выражение:

$$y(t) = y(t-1)\bar{x}_j(t) \vee x_i(t). \quad (5)$$

Это означает, что в данном случае вместо $J-K$ триггера можно использовать более простой $R-S$ триггер.

В общих случаях, когда при моделировании требуется учитывать задержку выходного сигнала исполнительной цепи, в модель ЭПМФ необходимо добавить каналы задержки $КЗ_3$ и $КЗ_4$ (рис. 1) соответственно на m и l тактов.

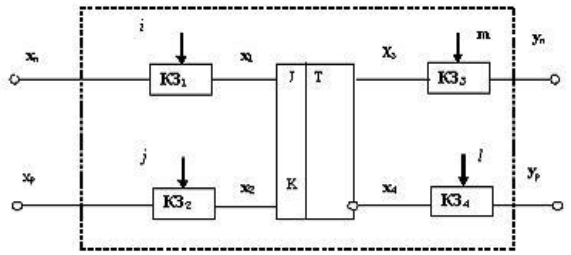


Рис. 1. Модель ЭПФ

Если необходимы задержки переключения в исполнительной цепи на величины τ_3 и τ_4, то параметры каналов задержки определяются:

$$m = \text{integer}\left(\tau_3 / \tau_m\right), l = \text{integer}\left(\tau_4 / \tau_m\right). \quad (6)$$

Выходные сигналы такой схемы замещения:

$$y_n(t) = \prod_{m=0}^{m} y(t-m), \; y_p(t) = \prod_{l=0}^{l} \bar{y}\,(t-l), \quad (7)$$

где $y(t)$ определяется по выражению (5).

Таким образом, при компьютерном моделировании элементов памяти, выполненных на электромагнитных приборах, запоминающих предыдущее воздействие, целесообразно применять многотактную схему замещения. В за-

висимости от требуемой точности в модели такого ЭП может быть использовано до четырех каналов задержки с различным количеством однотактных логических элементов памяти и один внутренний элемент памяти на $J-K$ триггере.

Выходные сигналы модели с учетом времени реакции на входное воздействие и на коммутацию исполнительной цепи определяются:

$$y_n(t)=\prod_{m=0}^{m}\left[y_n(t-m-1)\sum_{j=0}^{j}\bar{x}_p(t-m-j)\vee \vee\bar{y}_n(t-m-1)\times\prod_{i=0}^{i}x_n(t-m-i)\right], \quad (8)$$

$$y_p(t)=\prod_{l=0}^{l}\left\{\left[\bar{y}_n(t-l-1)\vee\prod_{j=0}^{j}x_p x(t-l-j)\right]\times \times\left[y_n(t-l-1)\vee\sum_{i=0}^{i}\bar{x}_n(t-l-i)\right]\right\}. \quad (9)$$

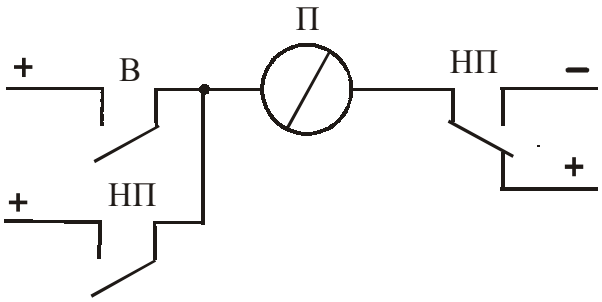
При несимметричной регулировке воспринимающей части ЭПФ, когда $x_n=\bar{x}_p=x$, получим:

$$y_n(t)=\prod_{m=0}^{m}\left[y_n(t-m-1)\sum_{j=0}^{j}x(t-m-j)\vee \vee\prod_{i=0}^{i}x(t-m-i)\right], \quad (10)$$

$$y_p(t)=\prod_{l=0}^{l}\left[\bar{y}_n(t-l-1))\vee\prod_{j=0}^{j}\bar{x}\ (t-l-j)\right]\times \times\sum_{i=0}^{i}\bar{x}\ (t-l-i). \quad (11)$$

Пример описания в модели элемента памяти с фиксацией воздействия под символом П приведен на рис. 2.

Результат работы динамической модели в процессе перевода стрелки из плюсового положение в минусовое положение показан на рис. 3.



#jП=НП+В*НП (x_1=НП+В*НП)
#kП=-НП(x_2=-НП) П=jk
($Y=\bar{x}_2 * y + x_1 * \bar{y}$)

Рис. 2. Пример моделирования ЭПФ

Описание объекта моделирования, например, типовой двухпроводной схемы управления стрелочным приводом [5], имеет следующие функции:

24 (число внутренних элементов автомата)
МУР=р*-СР
ПУР=-р*СР
СР=МУР+-ПУР*СР
НПСР=МУР*-
ППСР+ПУР*ППСР+НПСР*(ППСР*РР*-ЛП+-
ППСР* -РР*ПП)
#jП=МУР*НПСР
#kП=ПУР*НПСР
ППСР=jk
Л1=НПСР*-ППСР
Л2=НПСР*ППСР
#jРР=Л2
#kРР=Л1
РР=jk
Р1=РР*-Л1
Р2=-РР*Л1
#jПП=Л2*Р1*(-ЛП+ЛП)
#kПП=-Л2*Р2*-ЛП
ПП=jk
#jЛП=Р1*ПП*Л2
#kЛП=Р2*(-ПП+ПП)*-Л2
ЛП=jk
#jОК=ПП*ЛП*-НПСР*Р1 *(Р1 учитывается как контрольная цепь)*
#kОК=-ПП*-ЛП*-НПСР*Р2 *(Р2 учитывается как контрольная цепь)*
ОКР=jk
ОКРН=-НПСР*(ЛП*ПП*Р1+-ЛП*-ПП*Р2)
2 (число выходов автомата)
ПКР=-ППСР*ОКРН*-ОКР*-НПСР
МКР=ОКРН*ППСР*ОКР*-НПСР

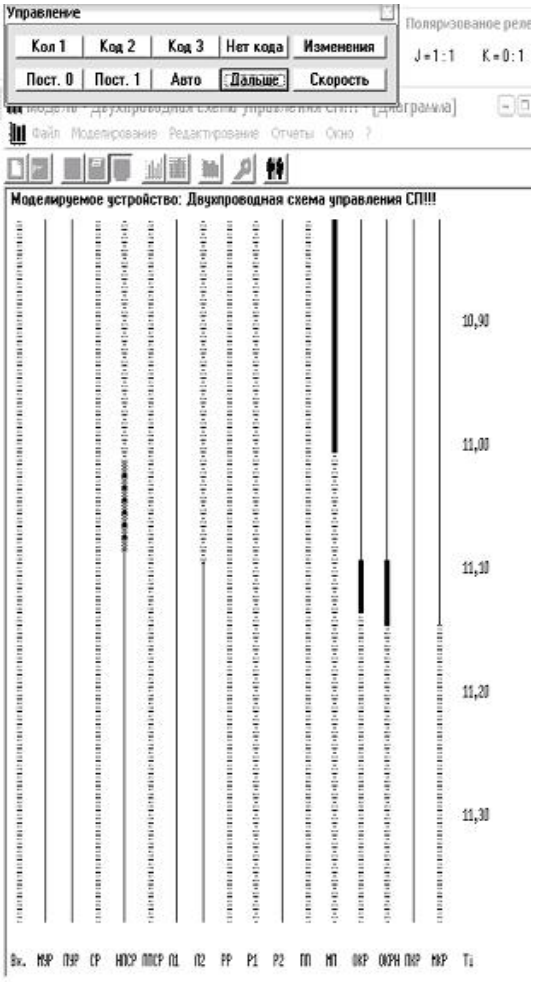


Рис. 3. Пример моделирования устройства

Результаты компьютерного моделирования полностью совпадают с описанием режимов работы натурного образца в стандартных и аварийных ситуациях.

Изложенный материал позволяет сделать вывод о работоспособности предложенной модели и достоверности аналитических выкладок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев С. С. Описание и реализация протоколов сетей ЭВМ. – М.: Наука, 1989. – 272 с.
2. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Кравцов Ю. А. Дискретные устройства ж.-д. АТС. – М.: Транспорт, 1988.
3. Андреевских А. В. Компьютерное моделирование циклических входных сигналов с применением компонентной объектной модели // Информационно-управляющие системы на ж.-д. транспорте: Зб. наук. пр. ХІІТу. – Х., 1999. Вип. 5–6. – С. 18–20.
4. Андреевских А. В. и др. Многотактные элементы памяти без фиксации воздействия с нелинейными задержками. The 5th international scientific conference of railway experts. Yugoslavia, Vrnjacka Banja, Oct. 1998.
5. Сапожников Вл. В. Станционные системы автоматики и телемеханики. – М.: Транспорт, 2000.

Поступила в редколлегию 26.01.04.

УДК 656.259.12

Т. Н. СЕРДЮК, В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КОДОВОГО ТОКА В РЕЛЬСАХ

У даній статті наведено результати розробки автоматизованої мікропроцесорної системи, яка дозволяє контролювати та вимірювати параметрі кодового струму автоматичної локомотивної сигналізації в рейкових колах та визначати спектральний склад тягового струму. Система може бути використана на базі вагона-лабораторії або при проведенні вимірювань на перегоні.

В данной статье приведены результаты разработки автоматизированной микропроцессорной системы, которая позволяет контролировать и измерять параметры кодового тока автоматической локомотивной сигнализации в рельсовых цепях и определять спектральный состав тягового тока. Система может быть использована на базе вагона-лаборатории или при проведении измерений на перегоне.

In this paper the results of elaboration of automated microprocessor system are given. This system allows us to control and measured the parameters of code current of automatic locomotive signaling system and to define spectral composition of traction current. It can be used on the basis of car-laboratory or at the measurements on the railway section.

Введение

Безопасность движения поездов определяется достоверностью передачи информации о состоянии лежащих впереди участков железной дороги на локомотив, в том числе, от надежности работы устройств автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). В связи с этим параметры кодовых сигналов АЛС подлежат периодическому контролю [1]. Контроль осуществляется как непосредственно электромехаником и связан с выходом на поле, так и с помощью вагона-лаборатории, который оборудован аппаратурой типа «Контроль», предназначенной для измерения кодового тока частотой 25, 50 и 75 Гц, определения его временных параметров, вычисления координаты, скорости движения подвижного состава и контроля изолирующих стыков. Информация записывается на бумажной ленте с последующей обработкой. Существующие методы измерения базируются на физически и морально устаревших аппаратных средствах, не обеспечивающих достаточную точность измерений. К недостаткам используемых в настоящее время методов и средств контроля [2] можно отнести ограниченный набор контролируемых параметров, сложность и субъективизм при оценке результатов измерения.

Постановка задачи и цель работы

Применение современных микропроцессорных систем позволяют устранить отмеченные выше недостатки, а именно, контролировать большое число необходимых параметров, с обеспечением достаточно высокой точности измерения, проводить их обработку, автоматически контролировать отклонение от допустимых норм и извещать при их выявлении обслуживающий персонал, записывать и сохранять информацию в цифровом виде на магнитных и оптических носителях.

Целью работы является разработка микропроцессорной автоматизированной системы для контроля и измерения параметров кода АЛС.

Математическое описание процессов передачи информации в вагон-лабораторию

Для обеспечения необходимой точности контроля большого числа заданных параметров необходимо проанализировать процессы, протекающие при передаче информации на приемные катушки вагона-лаборатории. С этой целью было разработано математическое описание электромагнитных процессов при взаимодействии тока в рельсах с приемными катушками. Схематическое изображение системы приведено на рис. 1.

Кодовый ток $I_{\text{р}}$ от генератора П проходит по рельсам и взаимодействует с включенными встречно приемными катушками ПК1 и ПК2, расположенными на расстоянии l_0 от первой колесной пары подвижного состава. Наведенная в катушках суммарная ЭДС равна сумме ЭДС в каждой катушке $\dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2$.

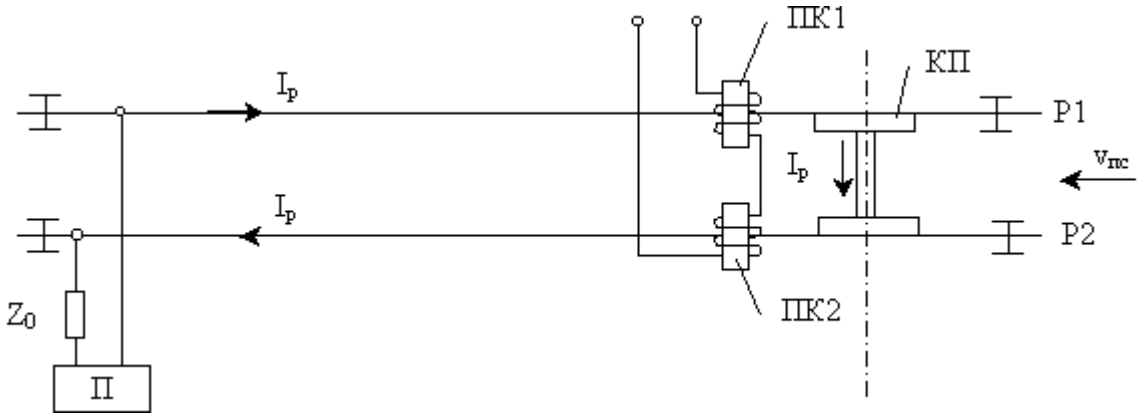


Рис. 1. Схема передачи информации по рельсовой цепи к приемным устройствам подвижного состава

При моделировании электромагнитных процессов заменим рельс эквивалентным круглым проводником бесконечной длины. По нему протекает кодовый ток синусоидальной формы $i = I_m \sin(wt + \varphi)$ с выбранным положительным направлением, совпадающим с направлением оси z. Для определения магнитной индукции и магнитного потока, пронизывающего приемные устройства АЛС, воспользуемся векторным потенциалом магнитного поля $\bar{A}$. Направление этого вектора совпадает с направлением тока в проводнике. Вектор-потенциал имеет следующую связь с магнитной индукцией и магнитным потоком:

$$\bar{B} = rot\,\bar{A}, \qquad (1)$$

$$\bar{\Phi} = \int_S \bar{B}\ d\bar{S} = \int_S rot\,\bar{A}\,d\bar{S} = \oint \bar{A}\,d\bar{l}\ , \qquad (2)$$

где $\bar{B}$ – вектор магнитной индукции; S – площадь поверхности, пересекаемой магнитным потоком; $\bar{\Phi}$ – магнитный поток.

Величина и направление векторного потенциала магнитного поля зависит от тока i, протекающего в проводнике длиной $d\bar{l}$, и по уравнению Пуассона равна [3]

$$\bar{A} = \frac{\mu\mu_0 i\,d\bar{l}}{4\pi R}, \qquad (3)$$

где μ – магнитная проницаемость среды (стали сердечника); μ_0 – магнитная постоянная; R – расстояние от излучающего проводника до точки в пространстве.

В переменном магнитном поле с учетом эффекта запаздывания волны, который проявляется при передаче сигнала на высоких частотах (например, в случае с тональными рельсовыми цепями), запишем вектор-потенциал в виде

$$\bar{A} = \frac{\mu\mu_0 i\left(t - \frac{R}{v}\right)d\bar{l}}{4\pi R}, \qquad (4)$$

где v – скорость распространения волны, м/с.

В векторной форме

$$\dot{\bar{A}} = \frac{\mu\mu_0 I_m e^{j\omega\left(-\frac{R}{v}\right)}d\bar{l}}{4\pi R}. \qquad (5)$$

Для определения вектора магнитной индукции воспользуемся цилиндрической системой координат. Запишем зависимость $\bar{B}\left(\bar{A}\right)$ в комплексной форме. В общем случае она имеет вид

$$\dot{\bar{B}} = rot\,\dot{\bar{A}} = \bar{r}^0\left(\frac{\partial \dot{A}z}{r\partial\alpha} - \frac{\partial \dot{A}\alpha}{\partial z}\right) +$$

$$+\bar{\alpha}^0\left(\frac{\partial \dot{A}r}{\partial z} - \frac{\partial \dot{A}z}{\partial r}\right) + \bar{z}^0\left(\frac{\partial(\dot{r}A\alpha)}{\partial r} - \frac{\partial \dot{A}z}{r\partial\alpha}\right). \qquad (6)$$

Поскольку вектор-потенциал имеет только составляющую $\dot{A}z$, а $\frac{\partial R}{\partial r} = \frac{r}{R} = \sin\theta$, то

$$\dot{\bar{B}} = -\bar{\alpha}^0\frac{\partial \dot{\bar{A}}z}{\partial r} = -\frac{\partial \dot{\bar{A}}z}{\partial R}\cdot\frac{\partial R}{\partial r} =$$

$$= \frac{\mu\mu_0 I_m d\bar{l}\sin\theta}{4\pi}\left[\frac{e^{j\omega\left(\frac{R}{v}\right)}}{R^2} + \frac{j\omega e^{j\omega\left(\frac{R}{v}\right)}}{Rv}\right], \qquad (7)$$

где r – проекция отрезка R на плоскость z.

Для бесконечно длинного проводника (рельсовой линии) индукция магнитного поля в точке на расстоянии R от излучателя (причем $r = R$, $\sin\theta = 1$)

$$B(t) = \frac{\mu\mu_0 I_m}{2\pi} \times \left[\frac{\sin\left(\omega t - \frac{\omega R}{v}\right)}{R} + \frac{\omega}{v}\cos\left(\omega t - \frac{\omega R}{v}\right) \right]. \quad (8)$$

В соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС, наведенная в приемной катушке АЛС, равна

$$E(t) = -\frac{W_в d\Phi}{dt} = -\frac{\mu\mu_0 I_m d^2}{2\pi} \times \left[\frac{\cos\left(\omega t - \frac{\omega R}{v}\right)\omega}{R} - \frac{\sin\left(\omega t - \frac{\omega R}{v}\right)\omega^2}{v} \right], \quad (9)$$

где $W_в$ – число витков катушки; d – сторона поперечного квадратного сечения сердечника локомотивных катушек.

Ниже представлены результаты моделирования ЭДС в зависимости от расстояния катушки над головкой рельса. А также результаты измеренной ЭДС в катушках локомотивной сигнализации вагона-лаборатории (рис. 2). Относительная погрешность составила ±3,5 %.

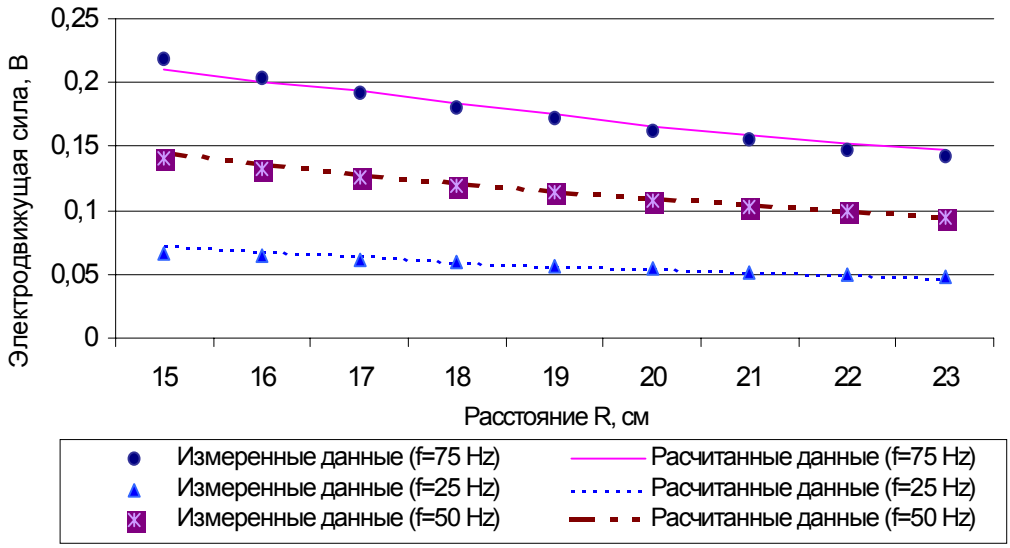


Рис. 2. График зависимости электродвижущей силы на расстоянии R от рельса для различных сигнальных частот

Полученная зависимость между током АЛС и ЭДС может быть использована при определении параметров кодового тока с помощью предлагаемого аппаратно-программного измерительного комплекса, в котором датчиками информации являются локомотивные катушки.

Структурная схема автоматизированной микропроцессорной системы

Структурная схема автоматизированной микропроцессорной системы приведена на рис. 3. Система осуществляет цифровую обработку сигнала и содержит следующие основные узлы: блок согласования, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), мультиплексоры, генератор тактовых импульсов, программируемый таймер, регистры данных и управления.

Для оцифровки входного аналогового сигнала используется десятиразрядный АЦП последовательного приближения типа К1113ПВ1 [4]. Максимальная частота дискретизации данного АЦП составляет 40 кГц, а дифференциальная погрешность – не более 0,1 %, что вполне достаточно для проведения спектрального анализа тока, протекающего в рельсах. Для задания частоты дискретизации входного сигнала используется программируемый таймер типа К580ВИ53. Интервал дискретизации можно менять в диапазоне от 25 мкс до 70 мин.

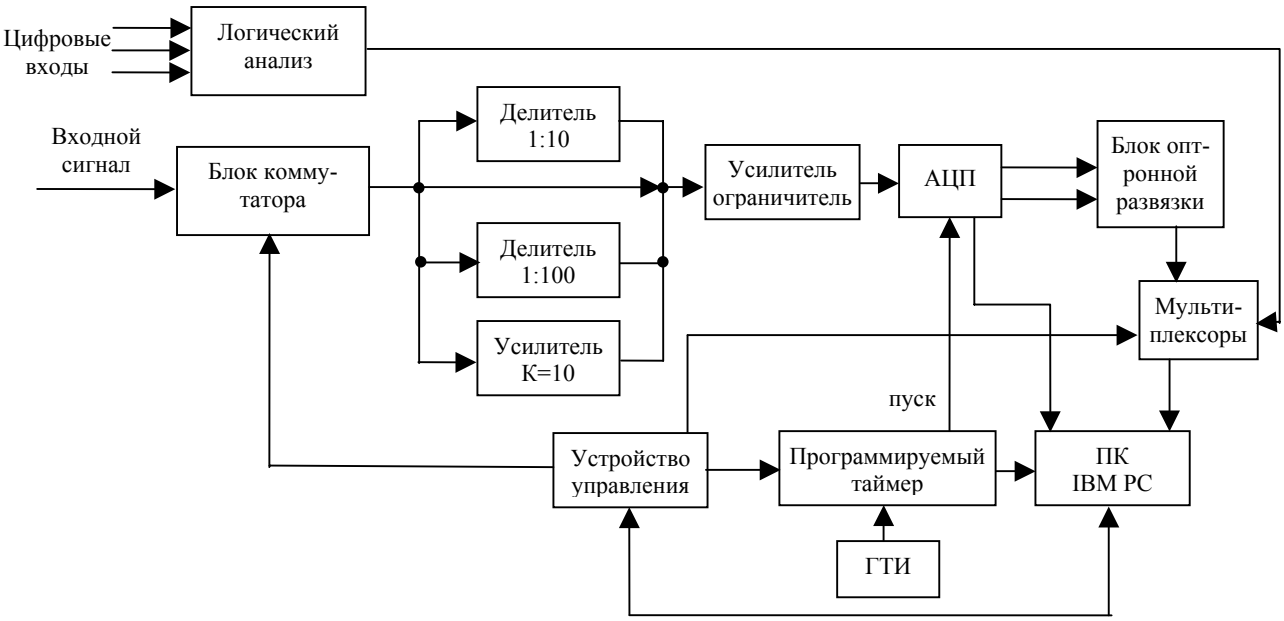


Рис. 3. Структурная схема аппаратно-программного комплекса для анализа параметров кодового тока в рельсах

Устройство управления предназначено для задания режимов работы программируемого таймера, мультиплексоров, а также блока коммутации. Блок коммутации предназначен для выбора диапазона напряжений входного сигнала. Он состоит из набора малогабаритных реле, позволяющих подавать сигнал либо прямо на усилитель-ограничитель, либо через делитель (1:10 и 1:100). Это позволяет увеличить допустимый входной диапазон напряжения до 500 В. Таким образом, данное устройство может быть использовано для записи сигнала не только с приемных катушек АЛС, а и с других датчиков, установленных не на локомотиве, а подключенных к рельсовой цепи, фидеру обратного тягового тока (для амплитудного и спектрального анализа помех, протекающих в рельсовых цепях), что расширяет область применения данного устройства. Также входной сигнал может быть усилен с помощью операционного усилителя в 10 раз, что необходимо для записи сигналов с катушек автоматической локомотивной сигнализации в диапазоне от 0 до 500 мВ с шагом 0,5 мВ.

Блок оптронной развязки необходим для повышения помехозащищенности и надежности работы измерительной системы. Он обеспечивает гальваническую развязку между аналоговой и цифровой частями. Мощные импульсные помехи, возникающие в РЦ, могут привести к сбою в работе компьютера, поскольку ПК непосредственно связан с цифровой частью измерительного комплекса. После исчезновения помехи устройство начнет работать в нормальном режиме, а возникшая помеха устраняется программно.

Алгоритм функционирования

Перед началом обработки сигнала в программируемый таймер записывается частота дискретизации входного сигнала. Программируемый таймер выдает сигнал «пуск преобразования сигнала», который вырабатывается с заданным интервалом. По окончании преобразования АЦП выдает сигнал готовности данных, что вызывает аппаратное прерывание LPT порта компьютера. Подпрограмма обработки прерывания осуществляет чтение данных, поступающих из АЦП в буфер оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) компьютера. Алгоритм обработки сигнала на аппаратном уровне представлен на рис. 4, *а*. Алгоритм цифровой обработки сигнала представлен на рис. 4, *б*. Компенсация дрейфа входного сигнала позволяет избавиться от погрешности, вносимой блоком согласования аппаратной части, и исключает влияние напряжения смещения входного каскада измерительного комплекса (операционных усилителей и АЦП).

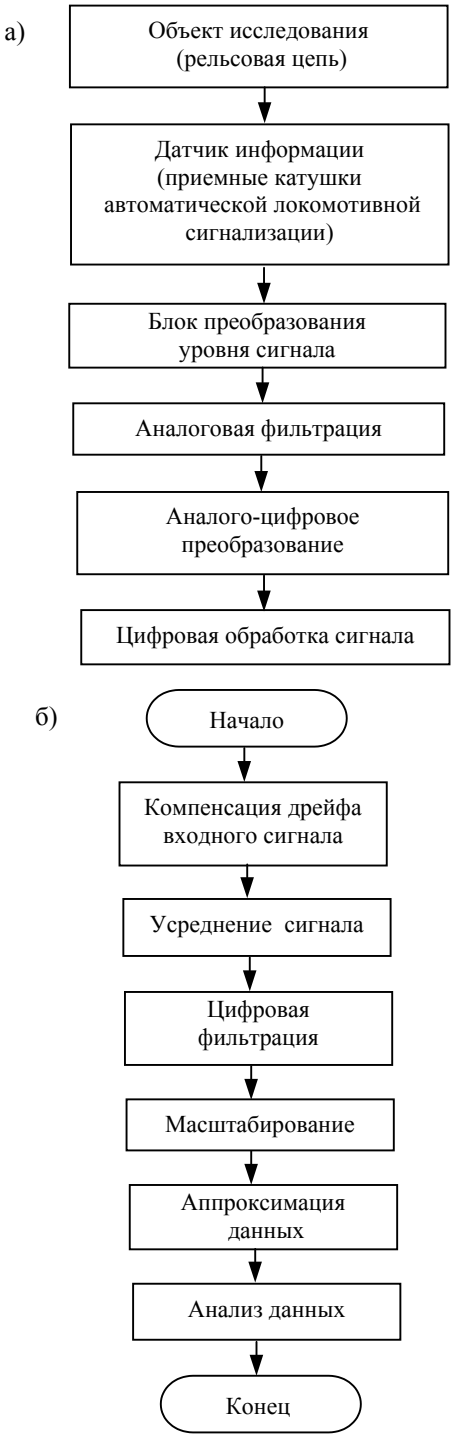


Рис. 4. Алгоритмы функционирования:
а – обработки сигнала на аппаратном уровне; *б* – цифровой обработки сигнала измерительным комплексом

Усреднение сигнала используется при анализе гармонических сигналов и вычисляет спектр сигнала не по одной выборке, а по нескольким. В случае, если необходимо исследовать импульсные помехи, блок усреднения программно исключается.

Для цифровой обработки сигнала в состав программного обеспечения включены процедуры, позволяющие реализовать алгоритмы цифровой фильтрации. Здесь реализован частотный способ фильтрации на базе быстрого преобразования Фурье. Цифровая фильтрация имеет следующие преимущества перед аналоговыми фильтрами: высокая стабильность частоты дискретизации (это свойство реализовано на аппаратном уровне за счет применения кварцевого генератора), простота перестройки частотной характеристики, возможность реализации сразу нескольких типов фильтров [4].

Масштабирование позволяет перевести цифровой код в значения реального сигнала контролируемого параметра, что необходимо для проверки правильности преобразования сигнала и для подготовки сигнала к анализу.

Для обработки записанного сигнала возможно применение подпрограмм линейной или сплайновой аппроксимации для получения промежуточных результатов между выборками. Линейная аппроксимация обладает меньшей точностью, зато позволяет обрабатывать большие массивы данных со значительной скоростью и может быть использована для предварительной оценки результатов измерений и при анализе данных без высоких требований к точности. Высокоточные данные могут быть получены с помощью сплайновой аппроксимации, но она требует больших вычислительных возможностей.

Аппаратно-программный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций при анализе измеренных данных: цифровое преобразование сигнала и ввод его в буфер с возможностью запоминания до 10 миллионов выборок; сохранение данных на жестком диске; создание базы записываемых и рассчитываемых данных; конвертирование их в Word, Excel, Matlab, Mathcad или создание текстовых файлов; вычисление спектральной характеристики кодового и тягового токов; определение средних значений амплитуд тока в любой точке исследуемого участка; вероятностная и статистическая обработка результатов измерений; фильтрация тягового тока с помощью специальных программ; определение асимметрии кодового и тягового токов в рельсах; вывод записанного сигнала и рассчитанных данных на монитор или принтер; проверка соответствия параметров кодового тока требованиям; выдача рекомендаций по поводу отклонений параметров токов от норм и их устранению; определение параметров РЦ (длины, сопротивлений и др.).

Результаты измерений

Данный измерительный комплекс позволяет записывать сигнал с выхода фильтра, как этого требует Инструкция [1]. Сигнал с катушек АЛС представляет собой сумму кодовых сигналов АЛС и тягового тока со всеми его гармоническими составляющими и импульсными помехами, возникающими во время работы локомотива.

На рис. 5 представлен кодовый сигнал типа «З», записанный с локомотивных катушек тепловоза, движущегося по железнодорожному участку с электротягой постоянного тока в районе тяговой подстанции.

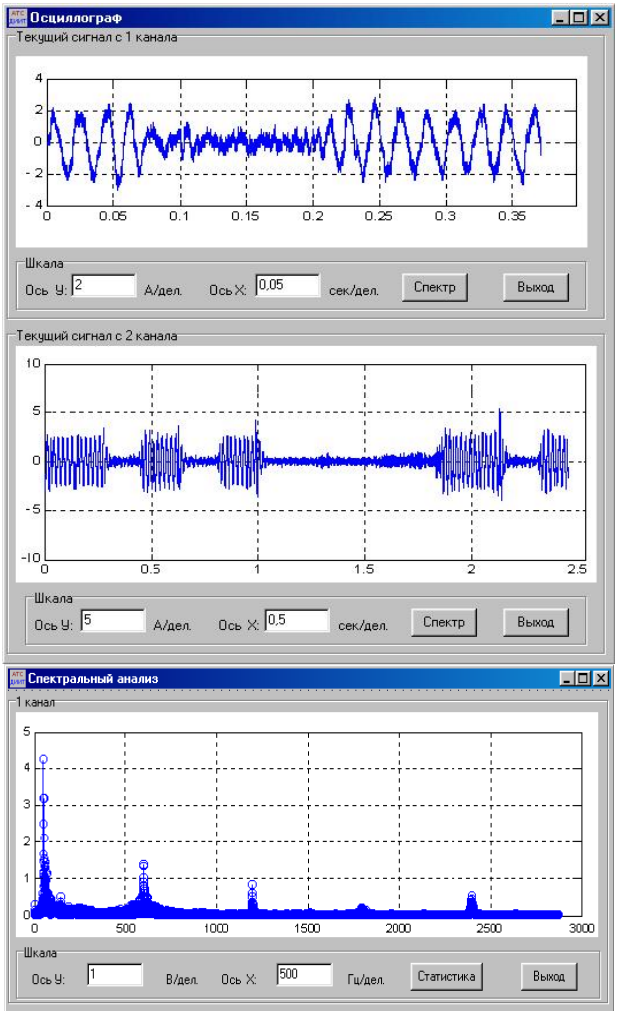


Рис. 5. Результаты измерений: форма сигнала, записанного с локомотивных катушек, в режиме осциллографа и его спектральный состав

Отклонения в параметрах кодов обнаружены не были. Зато с помощью спектрального анализа тока в кодовой паузе были выявлены помехи частотой 600, 1200, 1800 и 2400 Гц в обратном тяговом токе. Причиной возникновения помех данной частоты является работа двенадцатипульсового преобразователя, установленного на тяговой подстанции. Следовательно, данный аппаратно-программный комплекс может не только измерять параметры кодов в рельсовых цепях, а и сигнализировать о неправильной работе фильтров тяговой подстанции (в данном случае). Помехи данной частоты на работу рельсовых цепей влияния не оказывают.

Выводы

Разработана автоматизированная микропроцессорная система, позволяющая контролировать и измерять параметры токов в рельсовых цепях, проводить анализ электромагнитной обстановки на данном железнодорожном участке, а также определять спектр помех, протекающих в рельсовой цепи.

Измерения могут быть проведены как на базе действующего вагона-лаборатории, путем записи сигнала с приемных катушек, так и на перегоне при подключении аппаратуры к рельсовой цепи или фидеру обратного тягового тока (для амплитудного и спектрального анализа помех, протекающих в рельсовых цепях), что расширяет область его применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦШЕОТ/0012: Затв. Гол. упр. зв'язку, енергетики та обчислювальної техніки М-ва транспорту України 05.10.1998. – К., 1998. – 72 с.
2. Воронин В. А., Широков В. С. Об измерениях в рельсовых цепях тональной частоты // Автоматика, телемеханика, информатика. – 1999. – № 8. – С. 26–28.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1962. – 792 с.
4. Федорков Б. Г., Телец В. А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Олсон Г., Пиани Г. Цифровые системы автоматизации и управления. С Пб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.

Поступила в редколлегию 25.01.04.

UDC 656.259.1

JERZY MIKULSKI, JAKUB MŁYŃCZAK (Instytut Transportu, Politechnika Śląska, Poland)

DIAGNOSTICS OF POINTS DRIVE WITH PLC CONTROLLER APPLICATION

У роботі проведені дослідження струмових характеристик електроприводів. У результаті аналізу даних характеристик запропонована методика дистанційної діагностики електроприводів, запропонована також модель діагностичного обладнання для вимірювання струму.

В работе проведены исследования токовых характеристик электроприводов. В результате анализа данных характеристик предложена методика дистанционной диагностики электроприводов, предложена также модель диагностического оборудования для измерения установившегося тока.

In work the researches of current characteristics of points drive have been executed. As a result of analysis these characteristics a concept of remote diagnostics of points drive has been offered, a model of diagnostic equipment for measurement of setting current value has been offered also.

Introduction

Safety of trains movement in the great deal depends from the reliable work of the railway traffic control systems, and consequently from efficiency of diagnostic these systems. PKP recently started to employ station equipment status recorders and diagnostic systems for line blocks. However, presently in PKP there is no diagnostic equipment that could serve for creation of diagnostic models for railway traffic systems.

The aim of this work is the development of concept of remote diagnostics of point drive on the basis of research of their current characteristics.

The paper proposes application of a PLC-based diagnostic equipment for point drives. The setting current would serve as a diagnostic information for this controller. In the course of looking for an appropriate technical solution point drive current characteristics have been performed.

Measurement of current characteristics for EEA-4 point drive

Measurements of setting current and turnout setting time values in the function of turnout switching resistance have been performed using EEA-4 type drive provided with a three-phase drive. The measurements have been performed in the circuit as shown in Fig. 1. In this circuit, voltage control takes place by way of an autotransformer, whereas change of resistance of supply lines was achieved by using rheostats. Change of switching resistance was performed using test bench. Switching time of a drive was measured using a HIOKI 8833 recording device.

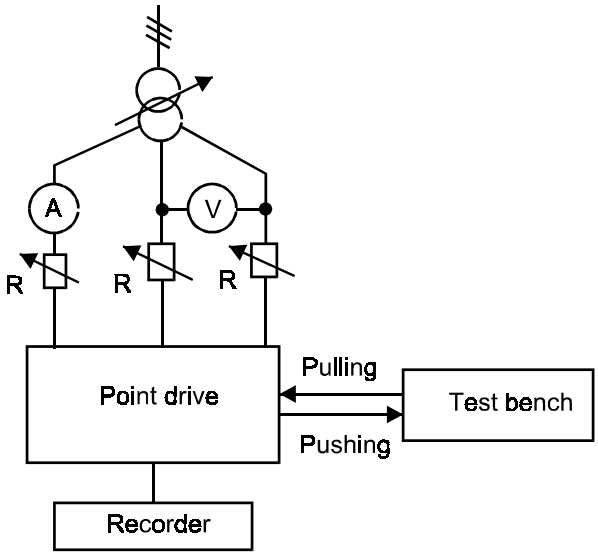


Fig. 1. Measurement circuit diagram

Fig. 2. shows dependence of setting current of EEA-4 in the function of turnout switching resistance. Measurements have been performed with switching resistance from <0÷7> [kN], at power supply 340, 380, 410 [V]. Supply cable resistance was assumed at 0 [Ω]. The chart shows that in the range of assumed loads, at fixed voltage, the value of setting current changes in the range <0,84÷3,01> [A].

Fig. 3 shows dependence of point drive switching time as the function of switching resistance at the power supply cable resistance 0 [Ω]. This test was carried out at supply voltage 380 [V] and power supply cable resistance equal to 0 [Ω]. This chart shows that in the range < 0÷2> [kN] the switching time is of fixed value, whereas above 2 [kN] the switching timer grows till 4 [s] for 7 [kN].

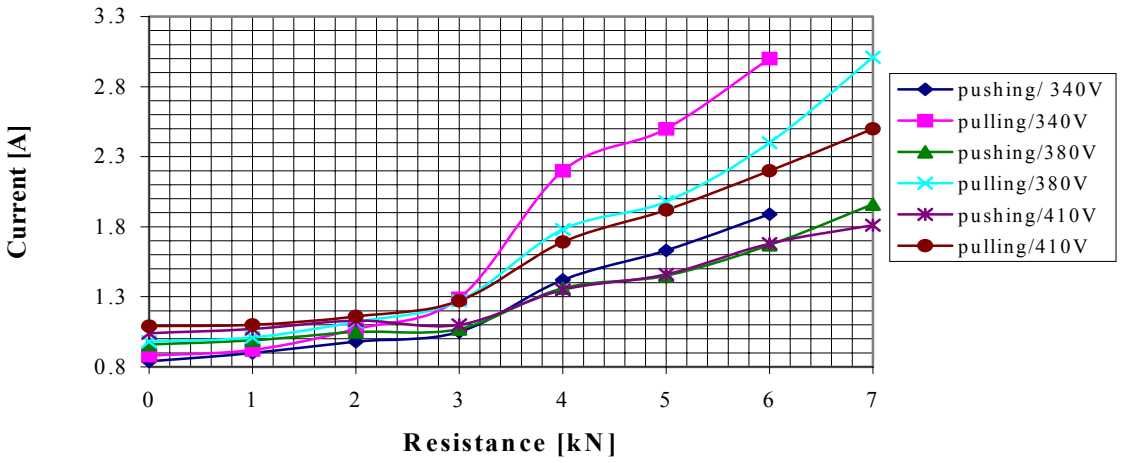


Fig. 2. Chart of setting current values as a function of switching resistance EEA-4 drive

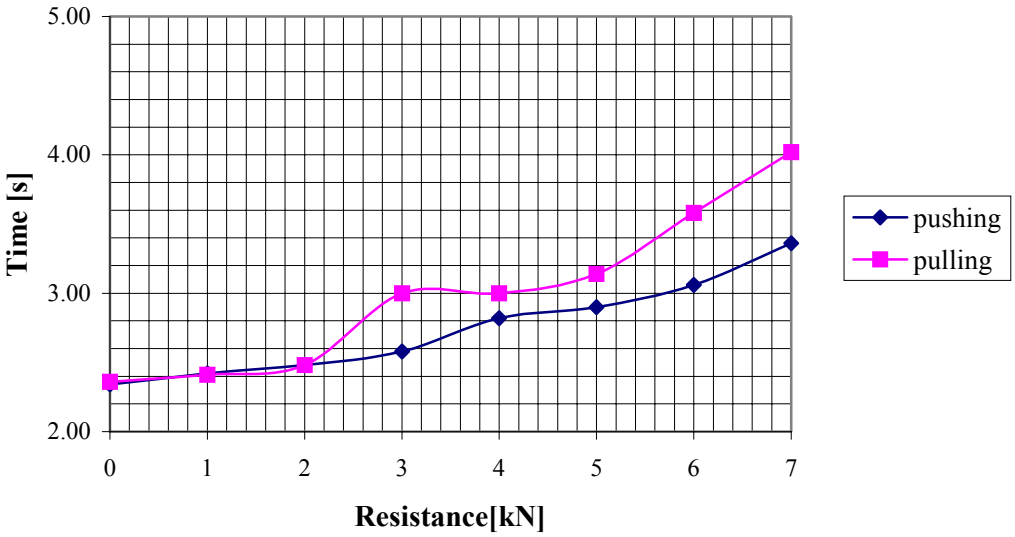


Fig. 3. Chart of dependence of switching time of a EEA-4 points drive as a function of switching resistance at the power supply cable resistance equal to 0 [Ω]

The above mentioned data and characteristics allow to draw the following conclusion that could be useful for the needs of EEA-4 drive diagnostics purposes:

1) as the value of setting current is a value depending of turnout switching resistance we may assume that when the value of setting current falls into the range <1,6÷3,5> [A] (at supply voltage from the range <340÷424> [V]) the drive in question is operational;

2) as the value of turnout switching time, at the worst condition where switching is still possible, amounted to 4,02 [s], the switching time equal to 4,30 [s] should be deemed as maximum. Exceeding this value shall be treated as malfunction;

3) assuming that the value of setting current depends only of supply voltage and supply cable, it is possible to determine: the resistance of power supply cable and condition of engine winding, as well as connections in cable boxes and in the relay room (in certain specific conditions). As in the performed analysis the value of engine winding resistance was treated as a fixed value, we may assume that the value of setting current in the function of power supply should fall into the range <0,8÷3,3> [A];

In the case of real measurements it is necessary to „cut" the startup current value, because it amounts to ca. 8 [A] resulting in error in the diagnostic program.

Model of diagnostic equipment for measurement of setting current value

Block diagram of the diagnostic device is similar to the measurement workstand presented on Fig 1. The difference consists in the fact that the measuring devices are not metering instruments but a programmable logic controller provided with analog to digital converters. A drawback of such a solution is a necessity to use current and voltage transformers with the goal to reduce the values of measured parameters to the standard measurement values of current and voltage. However, this solution features the following:

– a relatively low cost;

– easy communication with the diagnostic stand (a PC);

– continuous character of measurements;

– a preliminary calculation of requested characteristics;

– ability to perform self-tests on its own modules.

The block diagram of the diagnostic device is shown in Fig 4.

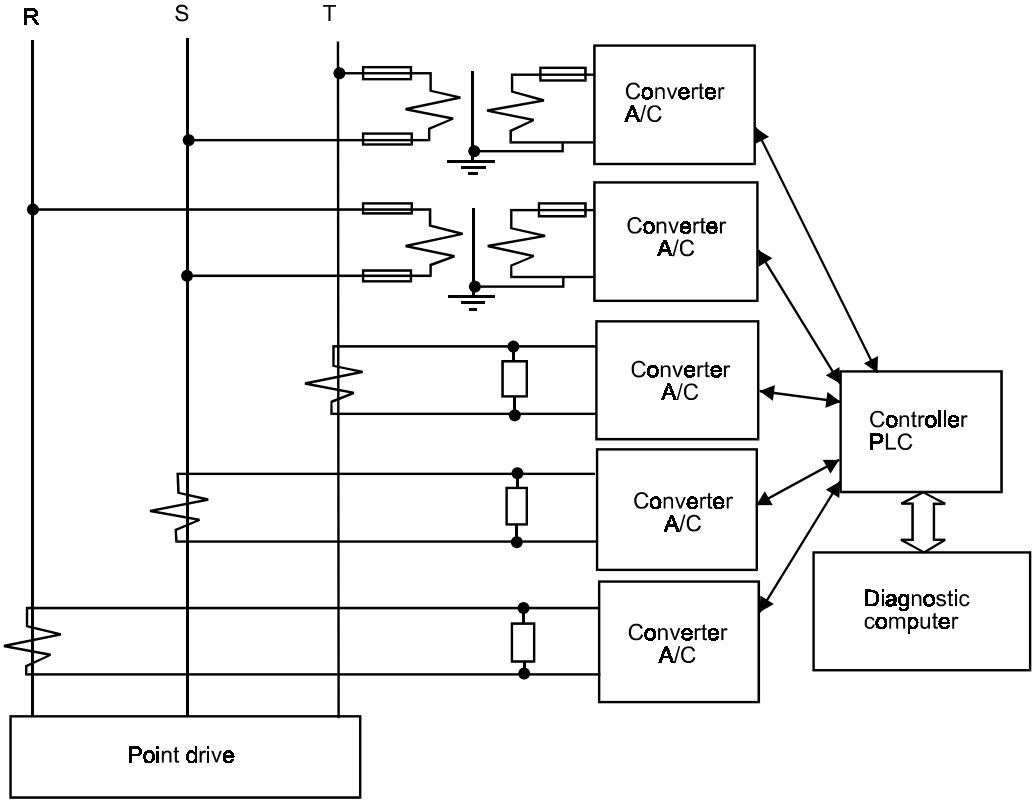


Fig. 4. Block diagram of a diagnostic device

An important issue is that the current value obtained from a measurement transformer ranges around 5 [A], the maximum current of a converter is 20 [mA], thus the proposed solution is to connect a resistor of predetermined parameters into the current transformer circuit and then measure the voltage drop on this resistor. With the known basic parameters of measurement transformers and the resistor it is possible to calculate the real value of setting current already in the controller. The measurement of setting voltage may be performed at two locations (for example, between phase R and S and phase S and T), whereas the current should be measured for each phase separately in order to detect the irregularities in the supply circuit and cable routing. As the railway traffic control systems used in the PKP lines have all their point drives powered from common terminals, only one measurement system is necessary for one station. Moreover we can assume that with hybrid equipment and with computer control panel only one turnout is switched at a time.

As a real measurement system a PLC controlled of Bernecker & Rainer (B&R) manufacturing series 2003 was proposed together with analog-digital converters (A/C). As a CPU was proposed a CP470, the intermediary module between CPU and analog inputs will be AF101 module. As analog inputs AI354 modules have been proposed.

Each component ii shown on Fig. 5.

The proposed solution features a low power consumption and modular construction. An important advantage of a modular construction is easy replacement of damaged components. The system is supplied with 24 [V DC]. Analog inputs may measure voltages up to 10 [V].

Operating cycle of a diagnostic controller

The task of a diagnostic controller consists in measurement of setting voltage and current. These are parameters whose deviation from normal constitutes an indication of irregularities of drive operation or power supply decay. First of all the controller checks the presence of setting voltage, and in the case of its decay the controller informs the diagnostic computer about this fact. If the setting voltage U_n is present the controller goes to the next cycle of operation – it checks presence of setting current I_n. If the current I_n is presetn, the controller measures its value, if it stops flowing, the controller sends information about the values of setting currents to the diagnostic computer. Upon sending the information about values of currents to the computer, the controller returns to the beginning of cycle (checks the setting voltage). The time of drive switching is equal to the time of flowing of setting current. The operating cycle of a diagnostic controller is shown on Fig. 6.

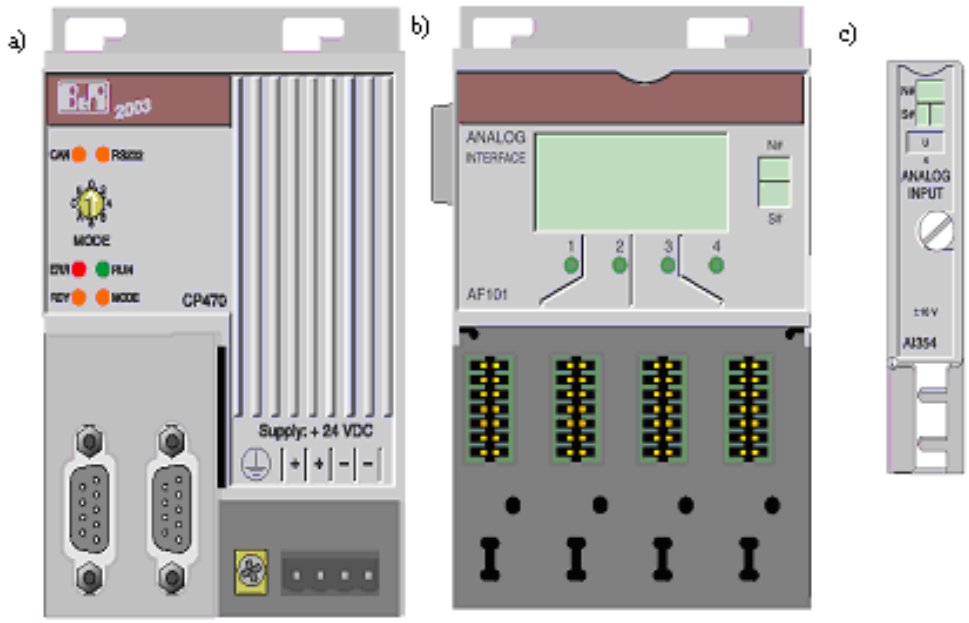


Fig. 5. Elements composing a diagnostic device: *a* – central unit module CP740; *b* – analog input module AF101; *c* – analog input AI354

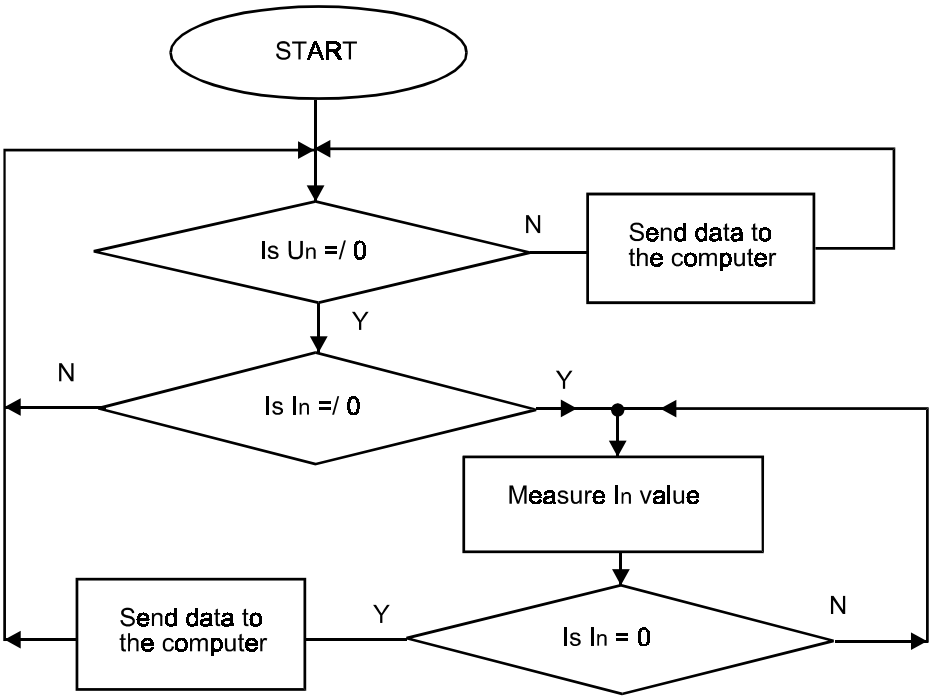


Fig. 6. Block diagram of diagnostic controller operating cycle

Conclusions

The paper presents the results of investigation of current characteristics of an EEA-4 point drive. A measurement of setting current was proposed in order to establish turnout switching resistance value. The current measurement will enable obtaining of diagnostic information with each switching of drive. Results of these data constitute a basis for construction of a diagnostic device model serving the purpose of diagnostics of point drives using their current characteristics. It is worth to remark (assuming that at one moment of time only one point drive is switched-over), that the proposed diagnostic device is "sufficient" for the entire control room (thus for the entire station in many cases). The proposed solution of diagnostic device may be used in various applications of railway traffic control systems.

BIBLIOGRAPHY

1. E 11 Instrukcja o zasadach eksploatacji i prowadzenia robót w urządzeniach sterowania ruchem kolejowym.(Instruction on principles of operation and carrying out work in the railway traffic control systems) Warsaw: Bulletin PKP, 2000.
2. E 14 Instrukcja diagnostyki technicznej urządzeń sterowania ruchem kolejowym. (Instruction on technical diagnostics of railway traffic control equipment) Warsaw: Bulletin PKP, 2000.
3. E 24 Instrukcja utrzymania urządzeń sterowania ruchem kolejowym na działce. (Instruction on maintenance of railway traffic control equipment within the lot) Warsaw: Bulletin PKP, 1996.
4. Manufacturer's technical documentation: DTR 89/EEA-4 Electrical point drive type EEA-4 Adtranz ZWUS Sp. z o. o. Katowice 1989.
5. B&R 2003 User's Manual, Version: 3.0 (February 1998).
6. Młyńczak J.: Analiza zagadnień diagnostyki eksploatacyjnej urządzeń sterowania ruchem kolejowym. (Analysis of diagnostics problems of railway traffic control equipment) Master of Science's thesis, Institute of Transport Technical Univesrity of Silesia. Katowice, 2001.

Submitted to the editorial board on 28.01.04.

УДК 519.6

Н. Н. БЕЛЯЕВ, Ю. Н. ЧИГРИНСКАЯ, Р. В. ВАРЧЕНКО (ДИИТ)

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ

Розроблена математична модель прогнозу забруднення атмосфери та поверхні землі під час руху тепловоза. Модель базується на тривимірному рівнянні міграції домішки. Для чисельного розрахунку використовується неявна поперемінно-трикутна різницева схема. Наведені результати моделювання.

Разработана математическая модель прогноза загрязнение атмосферы и поверхности земли при движении тепловоза. Модель базируется на трехмерном уравнении миграции примеси. Для численного расчета используется неявная попеременно-треугольная разностная схема. Приведены результаты моделирования.

A mathematical model to simulate atmosphere and land surface pollution in movement of a diesel locomotive has been developed. The model is based on a 3D equation of the impurity transfer. For numeric calculation the implicit difference alternatively-triangular scheme has been used. The results of simulation are presented.

Введение

Железнодорожный подвижной состав оказывает влияние на загрязнения воздушной среды (ВС), в первую очередь; выбросами тепловозов и потерями груза [3]. Так, маневровые тепловозы являются достаточно интенсивными источниками выброса различных загрязняющих веществ в атмосферу. Примером другого подвижного источника загрязнения ВС может служить выход паров из разгерметизированных цистерн. Ранее при рассмотрении проблемы загрязнения ВС использовали модель линейного источника загрязнения [5] (отметим, что данная модель широко применялась для расчёта уровня загрязнения ВС возле автомагистралей). Использование модели линейного источника позволяет создать простую регуляторную модель прогноза качества ВС, однако, данная модель обладает рядом существенных недостатков:

- часть железнодорожного пути не всегда можно рассматривать как прямолинейный участок;
- не всегда участок железной дороги можно моделировать как постоянно действующий линейный источник.

Величина выбросов от тепловозов (а значит и достоверность оценки загрязнения воздушной среды) рассчитывается по количеству израсходованного топлива [4]. При этом в учёт не принимаются такие факторы, влияющие на загрязнение воздушной среды, как высота источника загрязнения, его техническое состояние, режим работы. Известно, что для каждого тепловоза – как источника загрязнения воздушной среды, имеется информация о сроке службы, пробеге, т. е. при проведении стендовых испытаний для конкретного тепловоза можно получить достаточно достоверную информацию о количестве выброса q того или иного загрязняющего вещества. Данные такой инвентаризации могут быть положены в основу расчёта рассеивания вредных веществ от тепловозов в атмосфере. При этом оценка ущерба и плата за ущерб могут взиматься с учётом как условий рассевания, так и в зависимости от места выброса и интенсивности загрязнения конкретных экологических объектов, расположенных вдоль маршрута движения.

Целью настоящей работы является разработка компьютерной модели и создание на ее основе методики экспресс-расчёта рассеивания вредных веществ от тепловоза. Предложенная модель может быть положена в основу разработки методики расчёта экологического ущерба и платы за ущерб.

Постановка задачи, математическая модель

Рассматривается движение тепловоза на участке Приднепровской железной дороги. Требуется выполнить расчет процесса загрязнения примагистральных объектов загрязнителем, который выбрасывается тепловозом при его работе. В разработанной компьютерной модели движение тепловоза (источника выброса вредных веществ в атмосферу) моделируется движением точечного источника загрязнения интенсивности $q = f(r, t)$, где $r = (x, y, z)$ – координаты расположения тепловоза; t – время.

Таким образом, при расчёте процесса рассеивания вредных веществ (ВВ) от тепловоза учитывается изменение интенсивности выброса

с течением времени на различных участках маршрута. Процесс рассеивания ВВ от тепловоза описывается следующим уравнением градиентного типа [1]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}+\frac{\partial u\varphi}{\partial x}+\frac{\partial v\varphi}{\partial y}+\frac{\partial(\omega-\omega_s)}{\partial z}+\sigma\varphi=$$
$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)+\frac{\partial \varphi}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)+$$
$$+\sum q_i(t)\delta(r-r_i), \quad (1)$$

где φ – концентрация загрязняющего вещества; u, v, ω – компоненты вектора скорости ветра; μ_x, μ_y, μ_z – коэффициенты турбулентной диффузии; σ – коэффициент, учитывающий химический распад загрязняющего вещества; ω_s – скорость гравитационного осаждения; $\delta(r-r_i)$ – дельта-функция Дирака.

Постановка краевых условий для уравнения переноса примеси (1) рассматривается в работах [1; 2].

Метод решения

Уравнение миграции примеси (1) расщепляется на три уравнения более простого вида при интегрировании на временном шаге ∂t :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}+\frac{\partial u\varphi}{\partial x}+\frac{\partial v\varphi}{\partial y}+\frac{\partial(\omega-\omega_s)}{\partial z}+\sigma\varphi=0;$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)+\frac{\partial \varphi}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right);$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}=\sum q_i(t)\delta(r-r_i).$$

Первое уравнение из этой системы описывает перенос примесей по траекториям, второе уравнение описывает перенос примесей в атмосфере под действием диффузии, третье уравнение учитывает влияние источника выброса примесей. Численное интегрирование данных уравнений осуществляется по неявной попеременно-треугольной разностной схеме [2].

Особенностью используемой разностной схемы является то, что на каждом дробном шаге неизвестное значение концентрации примеси определяется по явной схеме (метод бегущего счета).

Результаты

На основе модели (1) разработан пакет прикладных программ «TRAIN». Пакет реализован на алгоритмическом языке FORTRAN. Пакет программ может быть также использован для расчёта уровня загрязнения атмосферы, примагистральных объектов в случае разгерметизации движущихся цистерн, и выброса при этом в атмосферу вредных веществ. При решении этого класса задач весьма важно определить количество вредного вещества, выделяющегося из разгерметизированной цистерны в процессе её движения. Здесь возможно два подхода:

1. Оценка по «остатку» вещества в цистерне (необходимо отметить, что данный подход достаточно сложно реализовать на практике, т. к. заполнение цистерн осуществляется с определённой долею погрешности, которая может быть соизмерена по величине с испарившейся частью на коротком участке маршрута).

2. Расчётный – т. е. получение информации о количестве выброса в атмосферу q на основе либо использования эмпирических зависимостей, либо из решения газодинамической задачи.

Особый интерес представляет расчет уровня загрязнения примагистральных объектов от подвижного состава. Поскольку вблизи дороги могут находится частные владения, то не исключены претензии этих владельцев к управлению железной дороги по выплате ущерба (как известно из зарубежного опыта, наиболее часто претензии предъявляют владельцы с/х угодий в случае снижения урожайности культур). Необходимо отметить, что определение интенсивности загрязнения конкретного примагистрального объекта – сложная задача. Ее решение может быть получено при условии, что известна динамика загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности от движущегося источника. Количество примеси, попавшей на конкретный объект примагистральной территории при движении источника выброса загрязняющих веществ (тепловоз, цистерна), рассчитывается так:

$$G=\int_{t_1}^{t_2}\iint_{\Delta R}\bar{\sigma}\varphi\,dx\,dy\,dt,$$

где $\bar{\sigma}$ – коэффициент, учитывающий аккумуляцию объектом загрязнения [2]; ΔR – площадь объекта.

Рассмотрим применение разработанного пакета программ для решения конкретной прикладной задачи: на участке железной дороги возле станции Днепропетровск–Грузовой (Днепропетровск) движется тепловоз со скоро-

стью $V = 12$ м/с. Класс стабильности атмосферы – D (по Пасквуилу-Гиффорду). Высота приземного слоя – 100 м, скорость ветра – 2 м/с, азимут – 156° (рис. 1). Выброс CO от тепловоза составляет $q = 10$ ед. (в безразмерном виде). Рядом с магистралью находится лесополоса и сельхозугодья. Требуется оценить динамику загрязнения атмосферы и примагистральных объектов при работе тепловоза на участке железной дороги длиной 500 м.

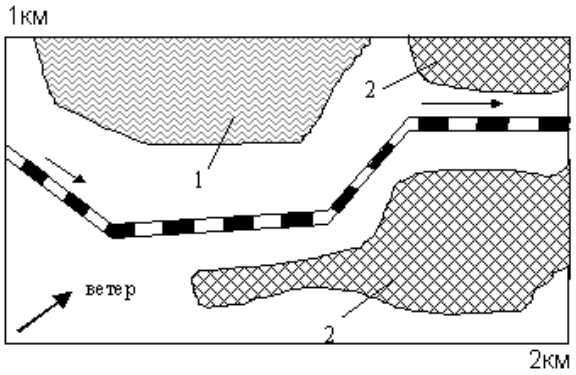


Рис. 1. Схема расчетной области:
1 – с/х угодья; *2* – лесопосадка

Результаты расчета загрязнения атмосферы (на уровне $z = 2$ м) при движении тепловоза показаны на рис. 2–4. Из них видно, что зона загрязнения атмосферы представляет собой шлейф, ориентированный по направлению движения ветра, расширяющийся под действием атмосферной диффузии. Значительному загрязнению при данных метеоусловиях подвергается лесопосадка. Это хорошо видно из табл. 1, где показано, как с течением времени увеличивается интенсивность загрязнения примагистральных объектов. Данная информация может служить основой для расчета экологического ущерба от подвижного состава.

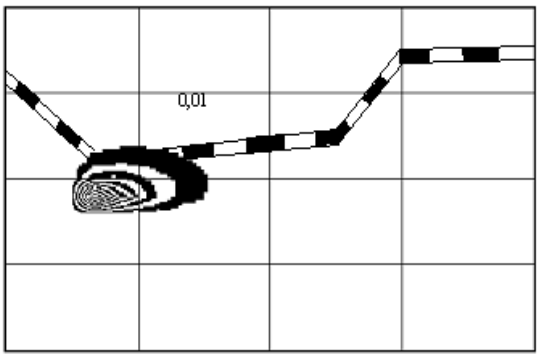


Рис. 2. Распределение концентрации примеси, выбрасываемой движущимся тепловозом (t = 346 с)

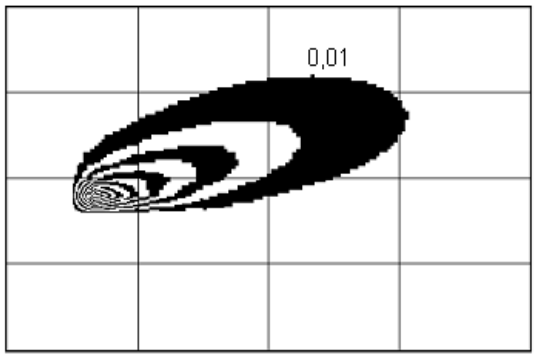


Рис. 3. Распределение концентрации примеси, выбрасываемой движущимся тепловозом (t = 613 с)

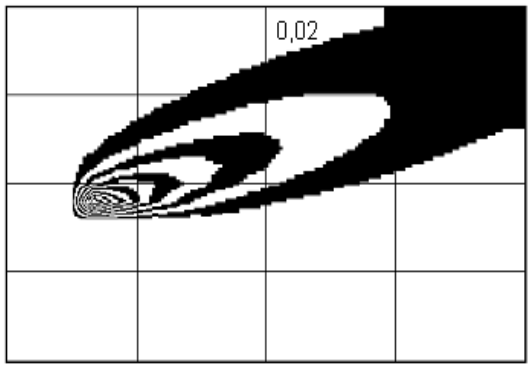


Рис. 4. Распределение концентрации примеси, выбрасываемой движущимся тепловозом ($t = 1280$ с)

Таблица 1

Количество CO, попавшее на объект при движении тепловоза

Район загрязнения	Концентрация CO (G) по времени t, с			
	1280	1273	1180	1013
С/х угодья	378	374	313	219
Лесопосадка	2998	2961	2465	1693

Выводы

Разработанная модель и пакет прикладных программ представляют собой эффективный инструмент анализа и прогноза уровня загрязнения атмосферы, подстилающей поверхности от подвижных источников. Решение задачи требует около 5 с при реализации модели на ПК типа PENTIUM. Результаты моделирования выдаются на печать или дисплей в виде изолиний концентрации примеси и таблиц.

Модель носит универсальный характер и может быть распространена на решение аналогичного класса задач при разгерметизации цистерн, уноса пыли с транспортируемого угля.

Совершенствование модели необходимо осуществлять в направлении разработки базы данных о величине выбросов по движущимся источникам на железной дороге.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляев Н. Н., Коренюк Е. Д., Хрущ В. К. Прогнозирование качества воздушной среды методом вычислительного эксперимента. – Д.: Наука и образование, 2000. – 208 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. – К.: Наукова думка, 1997. – 368 с.
3. Плахотник В. Н., Ярышкина Л. А., Сираков В. И. и др. Природоохранная деятельность на железнодорожном транспорте Украины: проблемы и решения. – К.: Транспорт Украины, 2001. – 244 с.
4. Тищенко А. А. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: Справочное издание. – М.: Химия, 1991. – 368 с.
5. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. – М.: Мир, 1980. – 539 с.

Поступила в редколлегию 28.05.03.

УДК 502:656.2.08.

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО, В. Н. ПЛАХОТНИК (ДИИТ)

КИНЕТИКА МИГРАЦИИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ЧЕРЕЗ ГРУНТЫ ВО ВРЕМЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЛИВОВ И ТРАНСПОРТНЫХ АВАРИЙ

У статті розглянуті екологічні наслідки транспортних аварій з нафтопродуктами в Україні. Наведено суттєвий вплив складу, ступеня ущільнення, а також метода дослідження на міграцію нафтопродуктів. Вказані гіпотези про різні механізми руху нафтопродуктів крізь ґрунти. Отримані результати дозволяють надати рекомендації щодо заходів з ліквідації наслідків аварій.

В статье рассмотрены экологические последствия транспортных аварий с нефтепродуктами, имеющие место в Украине. Показано существенное влияние состава, степени уплотнения, а также метода исследования на миграцию нефтепродуктов. Представлены гипотезы о различных механизмах движения нефтепродуктов через грунты. Полученные данные позволяют дать рекомендации относительно мероприятий по ликвидации последствий аварий.

The article considers the environmental consequences of transport accidents with oil products, which take place in Ukraine. A considerable influence of soil composition, the degree of its compaction, and also the soil examination procedure onto migration of oil products has been demonstrated. Some hypotheses on different mechanisms of oil products migration through soils have been suggested. The obtained data allow formulating recommendations regarding measures to eliminate the consequences of such accidents.

Несмотря на то, что нефтепродукты большей частью представляют вещества 3–4 класса опасности [1; 2], их влияние на биоценозы почвы и воды является значительным. С учетом широкой распространенности этих продуктов как на стадиях добычи и переработки, так и на стадии транспортировки [1], проблема их проникновения в грунты и миграции в грунтах во время технологических разливов и транспортных аварий является достаточно масштабной. Согласно данным [2], несмотря на развитие механических средств сбора пролитых нефтепродуктов, 80…90 % их во время таких разливов попадает в грунт и поверхностные водоисточники, а иногда, пропитывая почвы на значительные глубины, они проникают в подземные водоносные горизонты.

Ранее были выполнены исследования кинетики проникновения дизельного топлива марки Л через наиболее распространенные грунты Украины на лабораторной установке по ГОСТ 25584-90 при различных условиях, в том числе при различной уплотнен-ности грунта [3]. В настоящей работе описаны результаты изучения этого процесса на неуплотненных грунтах в полевых условиях. Эксперименты проводились на четырех полигонах, со следующими типами грунтов: красно-бурый и лессовидный суглинки, супесь и песок. С целью сопоставления с предыдущими результатами, температура и влажность грунтов были близкими к описанным в [3].

Методика экспериментов заключалась в выполнении следующих процедур. В естественных углублениях почвы устанавливались трубы из нержавеющей стали диаметром 55 мм и высотой 550 мм, которые заполнялись нефтепродуктом, поддерживался постоянный уровень жидкой фазы. Таким образом, обеспечивался постоянный напор жидкости на поверхность грунта. Практически создавалось постоянство размеров и формы «зеркала» нефтепродуктов на поверхности почвы. Через различные промежутки времени проводились срезки грунта и определялись глубины проникновения (миграции) используемого нефтепродукта. Исследования проницаемости песчаных грунтов выполнялись в соответствии с ГОСТ 23278-78. Продолжительность опытов составила до 10…12 часов; по статистике аварий этого времени обычно бывает достаточно для прибытия аварийных бригад и проведения процедуры откачки разлитых нефтепродуктов в резервные емкости.

На рис. 1–3 показаны типичные срезы исследованных грунтов, сделанные через шесть часов с момента разлива, позволяющие судить о динамике (характере) распространения используемого нефтепродукта в каждом отдельном случае.

Миграция жидкости в случае красно-бурого суглинка (рис. 1) происходит в большей степени в горизонтальном направлении (в стороны от центра), что, объясняется высокой дисперсностью и низкой проницаемостью этого грунта. Процесс фильтрации происходит по типу порового поглощения нефтепродукта и является довольно продолжительным.

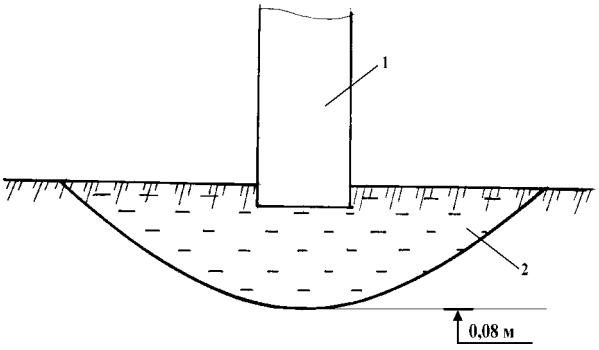


Рис. 1:
1 – труба из нержавеющей стали; *2* – область насыщения грунта нефтепродуктом

В случае песка (рис. 2) происходит преимущественное распространение нефтепродукта в вертикальном направлении под действием гравитационных сил. Движение жидкости происходит по относительно крупным и хорошо проницаемым порам между частицами, что связано с низкой дисперсностью грунта.

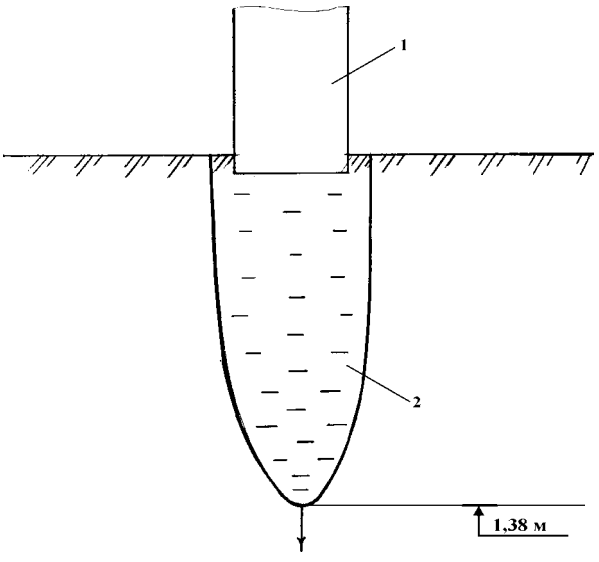


Рис. 2:
1 – труба из нержавеющей стали; *2* – область насыщения грунта нефтепродуктом

Зона проникновения дизельного топлива через супесь (рис. 3) близка к форме полусферы.

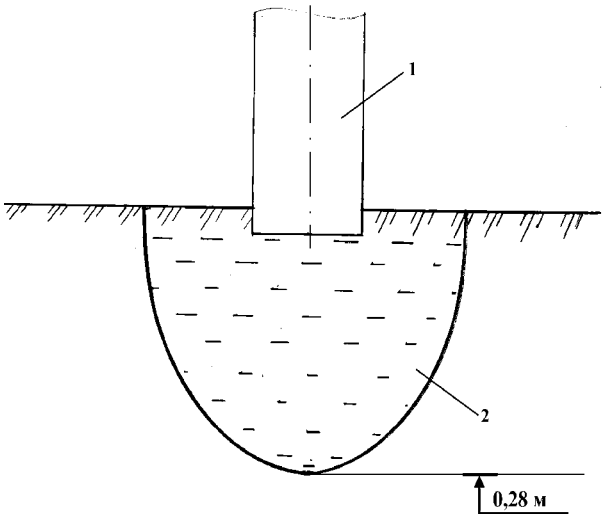


Рис. 3:
1 – труба из нержавеющей стали; *2* – область насыщения грунта нефтепродуктом

В практике перевозок дизельного топлива наземным (как железнодорожным, так и автомобильным) транспортом встречаются случаи аварий и разливов груза на грунтах различной степени уплотнения. В этой связи представилось интересным проследить влияние этого фактора на кинетику миграции в грунтах различной природы. На рис. 4, 5 сопоставлены кинетические кривые для указанных выше четырех видов грунта, при этом линии *1* и *2* (сплошные) получены при полевых испытаниях, а линии *3* и *4* (пунктирные) получены при лабораторных исследованиях грунтов. Несомненно, фактор сложения (степени уплотнения) оказывает определенное влияние на кинетику миграции. Так, скорость этого процесса dh/dt в случае суглинков снижается в 3–4 раза, в случае супеси – в 2 раза, а в случае песка – всего на 35–30 %.

Более подробные данные приведены в таблице, где V_y и $V_н$ – скорости миграции на уплотненных (в лабораторных условиях) и неуплотненных (полевые испытания) грунтах. К сожалению, в полевых условиях не удалось провести опыты при строго постоянных значениях температуры и влажности, однако, в соответствии с наблюдениями [3] допущенные отклонения влияют на скорости процессов в пределах погрешностей экспериментов. Вероятно, дизельное топливо как продукт, обладающий высокой вязкостью, проходит через грунты по порам, образующимся между частицами. При этом глинистые грунты обладают не только меньшими размерами межчастичных пор, но и большей сжимаемостью, вследствие чего сече-

ния этих пор дополнительно уменьшаются. В случае песчаных грунтов частицы почвы имеют значительно большие размеры и обладают повышенной сопротивляемостью сжатию. По этой причине их уплотнение мало сказывается на кинетике миграции дизельного топлива.

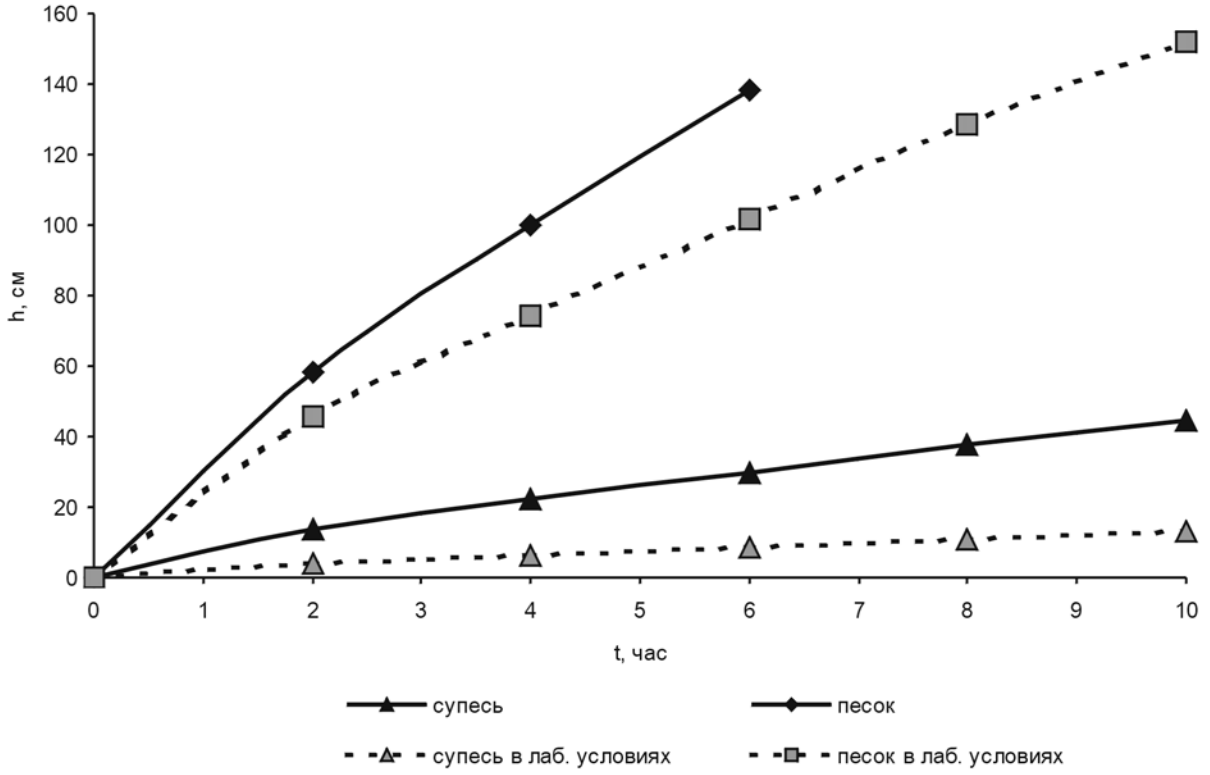


Рис. 4

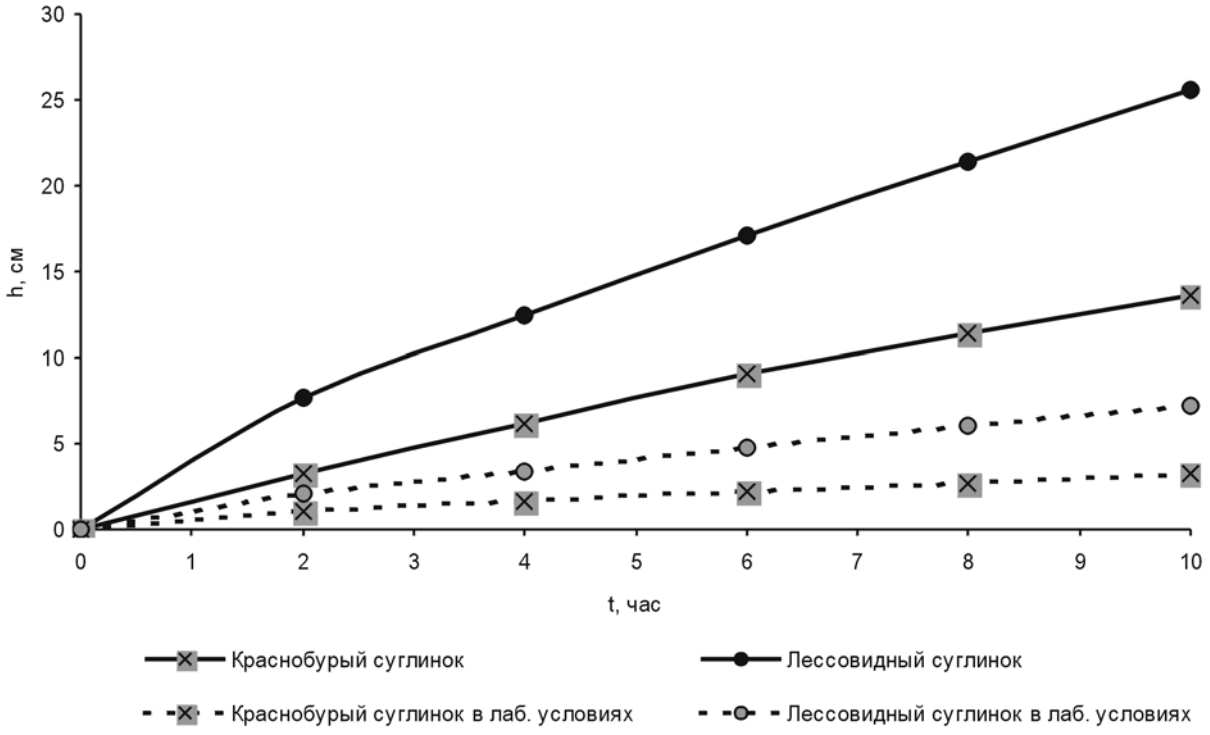


Рис. 5

Обращает на себя внимание тот факт, что несмотря на высокую вязкость дизельного топлива ($5{,}5 \cdot 10^{-6}$ м^2/с при температуре $20\,^{\circ}$C), отдельные виды грунтов могут пропускать этот продукт на значительные глубины, если не принять своевременные меры по ликвидации последствий аварий. Даже если принять во внимание, что в Украине мощность песчаных пластов невелика и на определенных глубинах залегают грунты, оказывающие сопротивление проникновению нефтепродуктов, влияние этих грузов на биоценозы почвы оказывается значительным ввиду расстояния на большие площади. В частности, нефтепродукты вступают во взаимодействие с компонентами почвенного поглощающего комплекса, в результате чего происходит нарушение равновесия геохимических процессов с одновременным фитотоксическим воздействием на растительность [7]. Дизельное топливо, обладая значительной вязкостью, на длительный период уменьшает свободное поровое пространство почвы, резко снижая ее влагоемкость и водопроницаемость [5; 6]. Однако основным негативным фактором воздействия нефтепродуктов на почву является, вероятно, гидрофобизация почвенных коллоидов, приводящая к их необратимой коагуляции [7]. Почва теряет способность к обеспечению корней растительности водой, минералами и органическими компонентами и в конечном итоге к воспроизводству биомассы.

Таблица

Влияние фактора уплотнения грунтов на скорость миграции дизельного топлива

Тип грунта	Температура окружающей среды, ºС	Влажность грунта, %	Скорость миграции, м/сут	
			V_y	$V_н$
Красно-бурый суглинок	26	0,81	0,08	0,34
Лессовидный суглинок	25	0,63	0,18	0,64
Супесь	27	0,39	0,33	1,12
Песок	27	0,30	3,80	5,32

Полученные данные позволяют дать рекомендации относительно мероприятий по ликвидации экологических последствий аварий с тяжелыми нефтепродуктами. Сформулированные раннее [4] технические решения, заключающиеся в обваловке, откачке нефтепродукта и сорбции его остатков доступными сорбентами с последующих их сжиганием, необходимо дополнить комплексом технологических процессов по обработке почвы. Выбор технологии необходимо осуществлять, исходя из типа грунта и его проникающей способности, температурных условий, влажности и рельефа местности в месте аварии, а также интервала времени от момента аварии до начала работ по ликвидации ее последствий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Plachotnik W., Sirakow W., Jaryschkina L. (1997) Ökologische aspekte von havarien der eisenbahnen der OSShD – mitgliedsländer., Zeitschrift der OSShD. № 6, P. 7–9.
2. Гасанов В. Г., Галандаров Ч. С. Почвенно-экологические условия и прогнозы освоения земельных ресурсов Апшеронского полуострова. Экология и охрана почв засушливых территорий Казахстана. – Алма-Ата, 1991. – С. 144–145.
3. Зеленько Ю. В., Плахотник В. Н. Оценка риска загрязнения нефтепродуктами подземных водоносных горизонтов во время транспортных аварий, Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон: Международной научной конференции: Материалы, – С Пб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2002. – С. 72.
4. Плахотник В. Н., Ярышкина Л. А., Таньшин В. Т., Сираков В. И. Природоохранная деятельность на железнодорожном транспорте Украины: проблемы и решения. – К.: Транспорт Украины, 2001. – С. 156–235.
5. Цытович Н. А. Механика грунтов. – М.: Государственное издательство по архитектуре и строительству, 1963. – С. 145–157.
6. Швец В. Б., Гинзбург Л. К., Гольдштейн В. М. и др. Справочник по механике и динамике грунтов. – К.: Будивельник, 1987. – С. 25–28.
7. Гасанов К. С., Абдуллаев Ф. З., Гасанов В. Г., Исмаилов Н. М. К вопросу нарушения нефтью почвенной экологии // Жур. хим. проблем. – 2003. – № 1. – С. 80–85.

Поступила в редколлегию 16.10.03.

УДК 624.21.014:625.1

В. І. БОРЩОВ, М. К. ЖУРБЕНКО, А. П. ТРЯКІН (ДІІТ)

ПОПЕРЕЧНІ СИЛИ В РЕЙКАХ КОЛІЇ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС РУХУ ПОЇЗДІВ ПО ПРОГІННИХ БУДОВАХ ТИПУ 690/7К

Робота присвячена експериментальному визначенню величин поперечних сил у рейках колії на прогінних будовах типу 690/7К під час руху по ним поїздів.

Работа посвящена экспериментальному определению величин поперечных сил в рельсах пути на пролетных строениях типа 690/7К при движении по ним поездов.

The work is devoted to experimental determination of the values of cross forces in the rails of track of sectional structures type 690/7K at movement of trains on these structures.

В умовах збільшення швидкостей руху поїздів по мостах велике значення мають сили взаємодії, що виникають в системі «міст-поїзд».

З метою експериментального вивчення горизонтальних поперечних сил взаємодії «колесо-рейка», які виникають при проході поїзда по мосту, галузевою науково-дослідною лабораторією штучних споруд та галузевою науково-дослідною колієвипробувальною лабораторією Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту були виконані спеціальні дослідження. Подібні дослідження на мостах раніше не проводилися.

Для експериментальних досліджень був вибраний міст, який мав дві руслові прогінні будови з розрахунковими прогонами по 110 м і дві берегові з прогінними будовами по 23 м. Руслові прогінні будови були виготовлені під навантаження С14 за проектом 690/7к і мали десять панелей довжиною по 11 м з теоретичною висотою головних ферм 15 м.

Горизонтальні сили взаємодії вимірювалися не тільки безпосередньо на мосту, але і на прямій ділянці підходів до нього.

Ці сили визначалися з використанням методики [1] за значенням напруг у кромках підошви і зовнішньої грані головки рейок в одному і тому ж перерізі рейки.

Напруги в кромках підошви і зовнішніх гранях головки рейок вимірювалися за допомогою тензорезисторів.

Схема розташування тензорезисторів у поперечному перерізі рейки наведена на рис. 1.

Оскільки горизонтальна і вертикальна жорсткості мостового полотна по довжині прогону неоднакові, інтерес становило вивчення зміни горизонтальних сил по довжині мосту. Це пов'язано з тим, що на жорсткість колії на мосту суттєво впливають жорсткості балок проїжджої частини та безпосередньо головних ферм прогінної будови мосту.

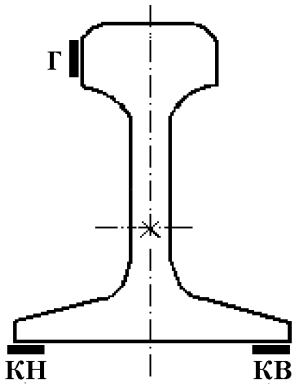


Рис. 1. Схема розташування тензорезисторів для вимірювання напружень:
Г – у зовнішній грані голівки рейки; *КН* – у зовнішній кромці підошви рейки; *КВ* – у внутрішній кромці підошви рейки

З цією метою горизонтальні поперечні сили було вирішено вимірювати на прогінній будові 2–3 в дев'яти перерізах над поперечними балками від П0 до П5 прогінної будови і в панелях 0–1, 2–3 і 4–5 (рис. 2).

Для визначення швидкості руху поїздів над опорами № 2 і 3 встановлювалися прилади для фіксації моментів проходу осей екіпажів через ці перерізи. Знаючи відстань між цими приладами та час проходу осі між ними, встановлювали швидкість руху поїзда.

Для усунення впливу перехідних процесів, що виникають під час руху поїзда по мосту, дослідна ділянка колії на підході була розташована на прямій на відстані понад 940 м від стояна мосту.

Вимірювання горизонтальних поперечних сил на дослідній ділянці колії підходу до мосту проводилися в 10 перерізах через два шпальних ящики.

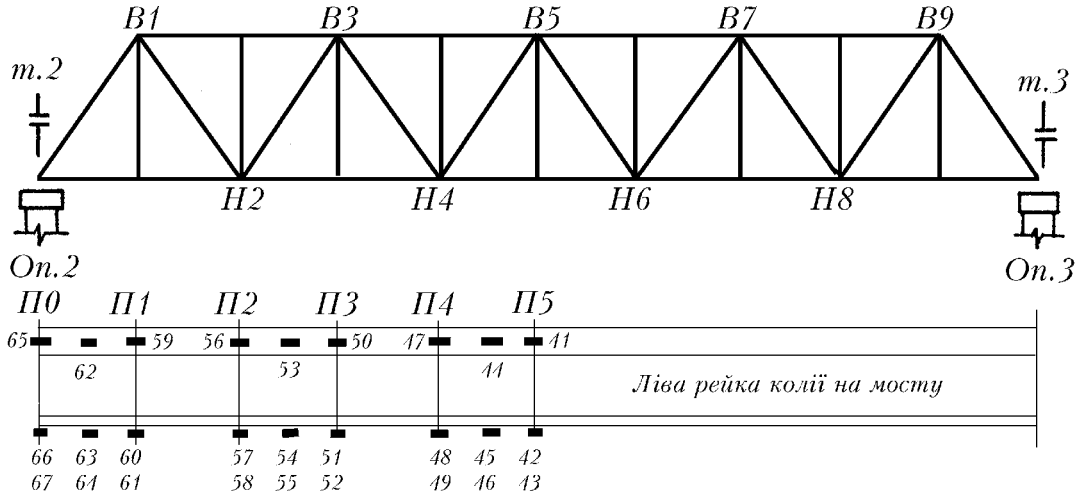


Рис. 2. Схема розміщення тензометричних мостів на прогінній будові

Вимірювання горизонтальних поперечних сил проводилися під час руху спеціально сформованого випробувального поїзда і звичайних графікових поїздів.

Випробувальний поїзд складався із 100 порожніх піввагонів, які рухалися із різною швидкістю від 30 до 100 км/год.

Формування випробувального поїзда із порожніх піввагонів пов'язано з тим, що під час руху по мосту графікових поїздів такого типу були помічені просторові коливання прогінних будов з надто великими амплітудами. Для вивчення цих коливань і був сформований випробувальний поїзд, який був використаний і для визначення поперечних сил в системі «колесо-рейка» на мосту та підході до нього.

Рух випробувального поїзда здійснювався в режимі тяги, на вибігу і підгальмовуванні.

Розрахунки горизонтальних поперечних сил за даними експериментальних вимірювань виконувалися з використанням ПЕОМ.

При цьому були отримані значення середніх, максимальних і мінімальних горизонтальних сил для кожної осі поїзда.

Отримані в результаті розрахунків середні значення горизонтальних сил в перерізах рейок над поперечними балками П1, П3 і П5 під час руху по мосту випробувального поїзда із порожніх піввагонів у режимі тяги із швидкістю 57,2…60 км/год для осей 270…400 наведені на рис. 3.

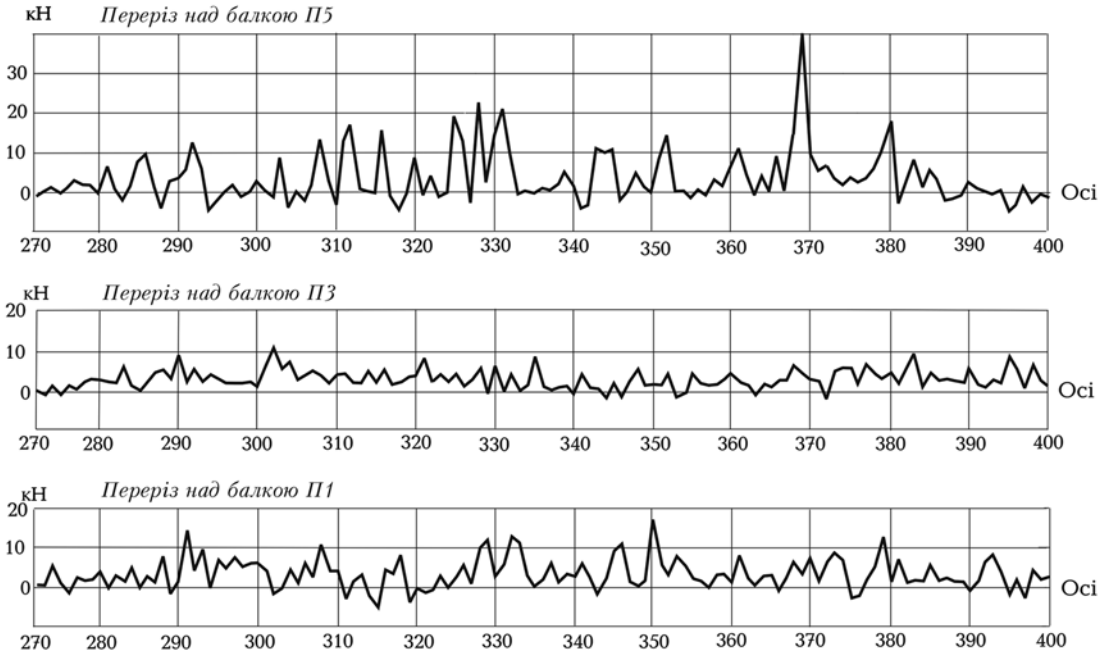


Рис. 3. Графіки середніх значень горизонтальних поперечних сил у рейках

Колеса різних осей вагонів чинять неоднаковий вплив на рейки при проході через одні і ті ж перерізи колії. У той час, як одні колеса екіпажів діють на рейки з силою 10…20 кН, інші колеса екіпажів можуть не чинити бічної дії або діяти з невеликою силою протилежного напрямку. Так, наприклад, при проході 325-ї осі поїзда через переріз над поперечною балкою П5 бічна горизонтальна сила досягає значення 20 кН, а при проході через цей переріз 327-ї осі бічна сила становить 3 кН в протилежному напрямку (за рахунок сил тертя);

У різних перерізах колії ті ж самі колеса поїзда по різному діють на рейки, а саме, якщо колесо 369-ї осі поїзда при проході перерізу над поперечною балкою П5 (середина прогінної будови) діє з силою 39,7 кН, то при проході над поперечними балками П3 і П1 бічна сила від цього колеса не перевищує 5 кН;

У різних перерізах колії в залежності від їх розташування по довжині прогінної будови рівень бічних горизонтальних сил різний. Найбільший рівень бічних сил від коліс поїзда спостерігається в перерізі над поперечною балкою П5 (середина прогінної будови). Цілий ряд коліс у цьому перерізі створюють бічну силу від 10 кН і більше. У той же час, в перерізі над балкою П3 (чверть прогінної будови) бічні сили, як правило, не перевищують 10 кН.

Найбільший вплив, як правило, створюють колеса екіпажів під час руху поїздів з набором швидкості, тобто в режимі тяги. Під час руху по мосту поїздів із порожніх піввагонів із швидкістю 57,2…63,3 км/год найбільша бокова сила досягала величини 39,7 кН при проході коліс поїзда над поперечною балкою П5 останньої сотні осей. Близьке до цього значення величина бокової сили (36,1 кН) досягала і при проході через цей же переріз рейок і другої сотні осей.

Максимальне значення бокової горизонтальної сили, яка виникла в рейках під час руху випробувального поїзда по мосту зі швидкістю 89 км/год, дорівнювало 53,4 кН.

Під час руху по мосту звичайних графікових поїздів із 100 порожніх піввагонів у режимі тяги найбільше значення поперечної сили було отримано для швидкості 64,0…69,5 км/год і дорівнювало 55,2 кН.

У разі уповільненого руху по мосту випробувального поїзда із порожніх піввагонів із швидкістю 81,4…76,2 км/год величина бокової сили в перерізі рейок над поперечною балкою П4 досягала 34,9 кН.

Як видно із наведених вище даних, що у всіх випадках як під час руху графікових поїздів із порожніх піввагонів, так і при русі випробувального поїзда, поперечні сили в рейках досягають досить значної величини, але максимальні значення сил не перевищують рекомендованого допустимого значення 100 кН (за міцністю колії).

При аналізі отриманих у результаті експериментальних досліджень даних будь-якої закономірності у зміні горизонтальних сил по довжині випробувального поїзда не встановлено.

У режимі руху поїзда з уповільненням величини бічних сил в колії мають менші значення, ніж під час руху поїзда в режимі тяги. Крім того, різких змін величин бічних сил також не виявлено.

Під час руху по мосту випробувального поїзда бічні сили, які зареєстровані в колії, менші за сили, що виникають у разі проходу по мосту з такою ж швидкістю графікових поїздів із порожніх піввагонів. Цей факт може бути пов’язаний з тим, що при формуванні випробувального поїзда всі вагони для нього ретельно підбиралися за своїм технічним станом і особливо за станом колісних пар і візків.

Випробування показали, що під час руху поїзда в режимі тяги найбільші величини бічних сил в колії виникають, як правило, при проході екіпажами середини прогінної будови, а найменші – при проході колісними парами перерізів, що розташовані в чверті прогону.

У разі уповільненого руху поїздів із порожніх піввагонів найбільші величини бічних сил в рейках виникають в приопорних перерізах, а мінімальні, як і в режимі тяги, при проході колісними парами перерізів, що розташовані в чверті прогону.

Слід відмітити і той факт, що горизонтальні бічні сили, які виникають в рейках під час руху поїзда по мосту, дещо більші за бічні горизонтальні сили в рейках колії під час руху поїзда на прямій ділянці підходу до мосту.

Середні величини бічних сил, що передаються з коліс на рейки, на прямій ділянці колії не перевищували10 кН.

Найбільша величина бічних сил 15 кН на прямій ділянці колії спостерігалася при швидкості руху поїздів 70…90 км/год.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ершков О. П. Особенности работы рельсов с контактными повреждениями // Труды ВНИИЖТа – М.: Транспорт, 1967. Вып. 264.

Надійшла до редколегії 01.04.03.

УДК: 625.113:656.2.022.846

М. Б. КУРГАН (ДІІТ)

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ПЕРЕБУДОВІ ДІЛЯНКИ ЗАЛІЗНИЦІ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ШВИДКІСНОГО РУХУ ПОЇЗДІВ

Запропонований новий підхід до розподілу ділянок залізниць на об'єкти оптимізації дозволяє використовувати неадитивні критерії в залежності від поставленої задачі.

Предложенный новый подход к разделению участков железных дорог на объекты оптимизации позволяет использовать неаддитивные критерии в зависимости от поставленной задачи.

The proposed new approach to division of railway sections into the optimization objects allows to use non-additive criteria, depending on the task set up.

Вступ

Як показує практика, одночасна перебудова великої кількості об'єктів на напрямках, що підлягають реконструкції, неможлива з безлічі різних причин, основними з яких є обмеження фінансових і матеріально-технічних ресурсів. Звідси виникає задача вибору оптимальної послідовності реконструкції лінії при обмежених ресурсах. При цьому важливо не тільки раціонально розподілити капітальні вкладення по ділянках, що входять у міжнародні транспортні коридори, але й ефективно їх використовувати.

Сформульовані в Цільовій комплексній програмі пропозиції є дотепер прогресивними і заперечень в основному не викликають. Однак у викладеній до неї методиці [1] залишається найменше пророблениим принципово важливе питання про розподіл залізничної лінії на ділянки оптимізації. Правильне вирішення цього питання має і теоретичне, і практичне значення, бо від нього залежить вибір критерію і кінцевий результат оптимізації.

У роботі [1] передбачалась глобальна оптимізація з встановленням максимальної швидкості руху на перегонах і станціях і не розглядалась локальна оптимізація з визначенням швидкості в границях кожного бар'єрного місця.

Постановка задачі

Метою роботи є обґрунтування принципово іншого підходу до розподілу ділянки транспортного коридору на об'єкти оптимізації, що дозволяє використовувати різні критерії оптимізації (неадитивні) в залежності від поставленої задачі.

Локальна оптимізація передбачає можливість встановлення максимально допустимої швидкості не тільки у межах кожного перегону, але й по кожному об'єкту (бар'єрному місцю). Вирішення такої задачі є значно складнішим уже тому, що необхідно розглядати взаємозалежні ділянки (об'єкти). Для таких ділянок характерним є те, що скорочення часу руху поїзда, отримане на кожній ділянці після усунення обмеження швидкості руху, не дорівнює виграшу в часі, якщо зняти всі обмеження швидкості. Тобто отримати достовірні вихідні дані можна тільки після виконання тягових розрахунків при різних комбінаціях зняття обмежень швидкостей (усунення бар'єрних місць). Таких комбінацій навіть у межах перегону виникає досить багато, а у межах залізниці такий об'єм розрахунків за прийнятний термін часу не під силу навіть сучасним комп'ютерам. Відзначені протиріччя між теоретичними передумовами і практичними рекомендаціями вимагають або розробки більш обґрунтованого принципу розподілу лінії на ділянки, або принципово іншого підходу при виборі раціональних ділянок перебудови лінії.

Аналіз принципів розподілу залізниці на ділянки (об'єкти) для визначення оптимальної стратегії підвищення швидкостей руху

У практиці вирішення оптимізаційних задач намітилася тенденція призначати довжину ділянки оптимізації не менше довжини перегону. Це обумовлено необхідністю враховувати в критерії оптимізації експлуатаційної складової, на величину якої, крім інших факторів, впливає обрис профілю перегону в цілому. Тому проста розбивка всієї ділянки оптимізації на окремі ланки вважалася в загальному випадку неприйнятною [2].

Якщо ж допустити розподіл залізниці на окремі ланки для подальшої оптимізації, то виявилось, що спосіб сполучення ланок залежить від багатьох факторів. Розрізняють такі основні два випадки.

Незалежні ділянки, коли рішення, прийняте в межах i-ї ділянки, не впливає на результати, прийняті на $(i+1)$-й ділянці. Випадок можливий, коли критерій може вважатися *адитивним*.

Взаємозалежні ділянки при *неадитивному* критерії. Рішення оптимізаційної задачі в цьому випадку є дуже складним. При усуненні близько розташованих бар'єрних місць на ділянці залізничної лінії локальна оптимізація в межах ланки (об'єкта) не дозволить одержати оптимального рішення в цілому через наявність геометричного і технічного зв'язку між об'єктами суміжних ділянок оптимізації, а також через те, що експлуатаційна складова є глобальною функцією поздовжнього профілю лінії.

При постановці задачі в теоретичному плані розробники «Програми» [1] справедливо мали на увазі розподіл лінії на ділянки за умови їхньої взаємної незалежності, що дозволяло приймати рішення як по кожній ділянці окремо, так і в сукупності по всіх ділянках лінії. Однак практичні рекомендації авторів щодо розподілу лінії на відрізки між осями роздільних пунктів або на роздільні пункти і перегони йдуть врозріз із принципом їхньої взаємної незалежності, що може привести до неправильних результатів рішення задачі. Так, наприклад, подання лінії як сукупності послідовно розташованих ділянок: роздільний пункт-перегін-роздільний пункт-перегін і т. д. може бути прийнято лише як наближений розподіл залізниці на ланки, оскільки сусідні ділянки в більшості випадків є залежними за швидкістю [2].

У подальших дослідженнях [3–5] були сформульовані вимоги до розподілу лінії на незалежні ділянки, що припускають:

– взаємну незалежність ділянок по швидкості пасажирських поїздів, тобто наявність обмежень швидкості в межах даної ділянки не впливає на рівні швидкостей на сусідніх з нею (ліворуч і праворуч) ділянках;

– взаємну незалежність ділянок за умови провадження робіт – роботи з перебудови лінії для підвищення швидкості поїздів (зняття обмежень) на виділених сусідніх ділянках можна здійснювати незалежно одна від одної, тобто технологічно ці роботи не зв'язані.

Перша вимога підлягає обов'язковому виконанню. Друга – не є настільки жорсткою, вона може бути врахована на більш пізній стадії, коли по сформованому оптимальному варіанту перебудови лінії здійснюється ув'язування послідовності й термінів виконання різних видів робіт зі зняттям обмежень швидкості пасажирських поїздів.

Перераховані вимоги не накладають ніяких обмежень ні на довжину ділянки, ні на присутність (чи, навпаки, відсутність) у межах однієї ділянки одночасно роздільного пункту і перегону, тобто в межі однієї ділянки можуть бути включені одночасно роздільний пункт (чи пункти) і перегін (чи його частина) чи, навпаки, роздільний пункт і перегін одночасно не включаються. Насамперед це залежить від обрису кривої швидкості, побудованої за умови повного використання потужності локомотива, і наявності обмежень швидкості (сполучення їхніх рівнів і взаємного розташування).

Сформульовані пропозиції щодо розподілу лінії на незалежні ділянки припускають побудову кривої швидкості пасажирського поїзда $V(S)$ з нанесенням максимально допустимої швидкості $V_{\max}$ (глобальне обмеження) і локальних обмежень $V_{\text{обм}} < V_{\max}$, обумовлених параметрами і технічним станом споруд і пристроїв дороги.

Аналіз розміщення існуючих обмежень швидкості руху пасажирських поїздів по довжині залізничної лінії показує, що за методикою [1] на одних ділянках скорочення часу руху пов'язано із завищеними капіталовкладеннями, а на інших – капітальні вкладення практично не приводять до підвищення швидкості.

Розрахунки витрат на усунення бар'єрних місць показують, що при розбивці ділянці на перегони й станції довжина останніх невелика (в середньому 2…2,5 км), виграш у скороченні часу руху поїзда при підвищенні швидкості складає 0,1…0,3 хв. Великий обсяг робіт припадає на короткі ділянки, а тому такий підхід робить недоцільним реконструкцію станцій.

Математична модель раціональної реконструкції залізниці при неадитивному критерії

Представимо локальну ділянку залізниці як набір об'єктів ω_i. Характеристиками кожного об'єкта є такі параметри:

- рівень швидкості руху, що відповідає існуючому стану об'єкта, $V_{\min}$;

- рівень швидкості руху, що буде можливий після реконструкції об'єкта, $V_{\max}$;
- вартість реконструкції об'єкта C_0 для переходу від швидкості $V_{\min}$ до швидкості $V_{\max}$;
- скорочення часу руху, що дасть реконструкція об'єкта, Δt.

Нехай Ω – множина об'єктів ω_i. Тоді задача зводиться до визначення такої підмножини U, щоб реконструкція обраних об'єктів забезпечувала скорочення часу не менше заданого, а її вартість при цьому була мінімальна. Сказане можна записати у такий спосіб.

Знайти $U \subseteq \Omega$ так, щоб

$$\begin{cases} K(U) \to \min, \\ \Delta t(U) \geq \Delta T, \end{cases} \qquad (1)$$

де $K(U)$ – вартість реконструкції набору об'єктів U, $K(U) = \sum_{\omega \in U} C_0(\omega)$; $\Delta t(U)$ – скорочення часу руху за рахунок реконструкції набору об'єктів U.

Визначення величини $\Delta t(U)$ є складною задачею, тому що об'єкти, розташовані відносно недалеко один від одного, будуть чинити взаємовплив при визначенні відповідних величин $\Delta t(\omega_i)$ (рис. 1). Тому функцію скорочення часу $\Delta t(U)$ неправильно розглядати як суму скорочень часу по кожному об'єкту. У більшості випадків виграш часу від усунення обмеження залежить від того, на якій швидкості поїзд наближається до бар'єрного місця і яку може набрати швидкість після його проходження. Тому під час рішення задачі оптимізації для кожного з набору об'єктів U, що розглядалися, значення функції $\Delta t(\omega_i)$ визначалися в процесі виконання тягових розрахунків. Було встановлено, що $\Delta t(U) > \sum_{\omega \in U} \Delta t(\omega)$.

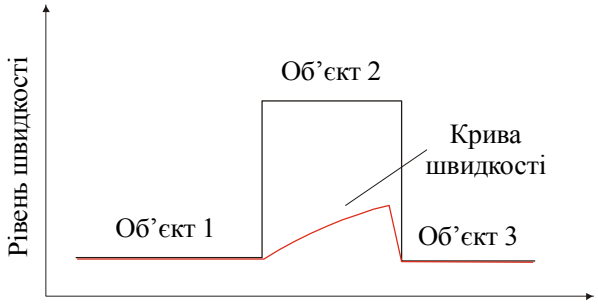


Рис. 1. Вплив близько розташованих об'єктів на визначення функції $\Delta t(U)$

Далі, на конкретному прикладі (рис. 2) показано вирішення оптимізаційної задачі із застосуванням функції множини [8] за методикою, викладеною в роботі [9].

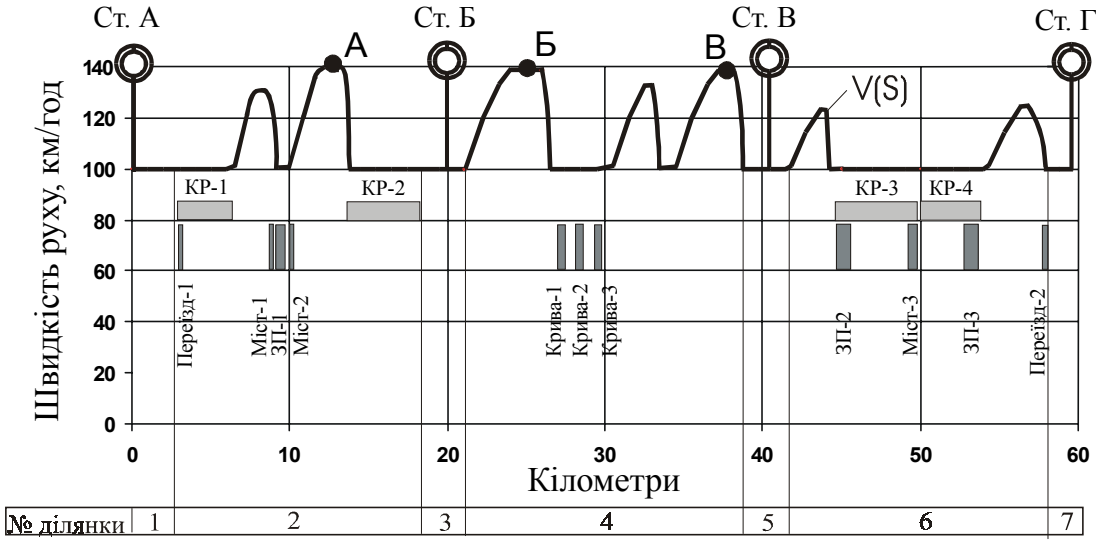


Рис. 2. Бар'єрні місця й крива швидкості $V(S)$ на дільниці, що складається з трьох перегонів

За результатами розрахунків побудована залежність скорочення часу Δt_i від об'ємів інвестування K_i, рис. 3. Користуючись представленим графіком, можна встановити ефект, тобто скорочення часу руху поїзда в залежності від розміру вкладаємих на реконструкцію капіталовкладень. Так, при виділенні інвестицій у розмірі 10,0 млн грн можна отримати скорочення часу руху поїзда, що дорівнює 5 хв, при інвестиціях 20 млн грн – скорочення часу

10 хв, при 40 млн грн – 15 хв. Використовуючи графік, приведений на рис. 3, можна вирішити й обернену задачу, тобто за заданим скороченням часу, наприклад 14 хв, по графіку визначити потрібні кошти – 30 млн грн і далі знайти їх оптимальне розподілення по ділянках.

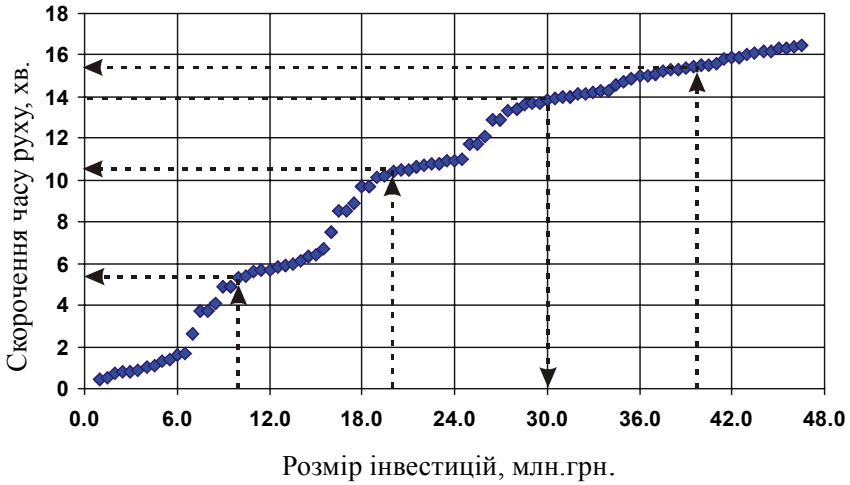


Рис. 3. Залежність скорочення часу руху пасажирського поїзда від об'ємів інвестування

У прикладних задачах динамічного програмування [10] графік $\Delta t_i(K_i)$, представлений на рис. 3, називають *функцією корисності*. Форма цієї кривої визначається двома важливими економічними умовами. По-перше, невеликі розміри виділяємих коштів (ресурсів), у сутності, не дають ніяких доходів і, по-друге, подальше збільшення коштів приводить, у кінці кінців, до ефекту насиченості.

В задачах оптимізації велике значення має вибір критеріїв ефективності. Їх можна звести до чотирьох груп:

- технічна ефективність;
- безпека і надійність;
- економічні показники;
- час руху або економія часу (табл. 1) [6; 7].

Таблиця 1

Види критеріїв оцінки варіантів

Класифікація груп критеріїв	Види критеріїв оцінки варіантів
1. Технічна ефективність (міра якості функціонування транспорту)	Пропускна здатність; провізна здатність; швидкість і терміни доставки вантажів; маневреність транспорту; потреба в паливі та ін.
2. Безпека і надійність	Безпека і регулярність руху; схоронність вантажів і навколишнього середовища; збереження здатності виконувати транспортні функції
3. Економічні показники (витрати у грошовому вираженні)	Собівартість перевезень; потрібні капітальні вкладення; вартість вантажної маси, що знаходиться в процесі транспортування; збиток, що наноситься навколишньому середовищу; тарифи на перевезення вантажів і пасажирів
4. Час руху або економія часу	Час руху поїзда; час обороту локомотива; час обороту вагона та ін.

Нижче показані підходи, дотримуючись яких можна використовувати той чи інший критерій, що відповідає цілям поставленої задачі при проведенні оптимізації.

Так, в економічних показниках одержують відображення практично всі сторони роботи транспорту. Собівартість перевезень визначається за формулою

$$C_o = \frac{\sum E}{\sum ql + \sum pl}, \qquad (2)$$

де $\sum E$ – сумарні експлуатаційні витрати, грн; $\sum ql$ – вантажообіг, млн т·км; $\sum pl$ – пасажирообіг, млн пас-км.

Із формули (2) випливає, що одним із шляхів зниження собівартості перевезень C_o є зменшення експлуатаційних витрат. Складові частини, з яких утворюються загальні витрати, включають в себе фонд оплати праці, витрати на паливо, електроенергію й матеріали, амортизаційні витрати, капітальний ремонт та інші роботи. Спі-

вставлення цих складових витрат на залізницях України за останні п'ять років показало, що відбувся суттєвий перерозподіл витрат [6].

Специфічною особливістю залізничного транспорту є те, що дизельне паливо й електроенергія виступають тут у ролі сировини для виробництва транспортної продукції. Витрати енергії на тягу поїздів є однією з основних статей витрат, пов'язаних з рухом. В свою чергу, витрати електроенергії залежать від механічної роботи сили тяги локомотива, яка витрачається якнайбільше на ділянках обмеження швидкості руху. Чим менше таких обмежень, тим менше протяжність розгонів і гальмувань і, як наслідок, дешевше вартість пробігу поїзда.

Розглянемо застосування різних критеріїв на прикладі, що представлений на рис. 1. Перший критерій – це скорочення часу руху Δt, другий – економія механічної роботи сили тяги локомотива ΔR_M. У кожному випадку фінансування однакове і складає 20 млн грн. Результати оптимізації з переліком набору об'єктів, що підлягають реконструкції, наведені в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Оптимізація за часом руху поїзда

K, млн грн	Δt, хв	Найменування бар'єрних місць
0,4	0,1	ЗП1
0,5	0,6	ЗП2, ЗП1
0,9	0,8	ЗП1, Крив3
1,7	1,4	ЗП1, Крив3
2,9	2,1	ЗП1, Крив3, Крив1
4,0	2,2	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4
5,9	3,5	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2
7,0	3,9	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3
9,0	4,0	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1 М2
10,3	5,7	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2
12,0	6,0	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1, М2, КР2
13,3	6,8	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3
15,7	7,6	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3, КР4
16,1	8,3	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3, КР4, ЗП2
16,1	8,7	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1, М2, КР2, КР1, Крив3
16,7	9,0	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3, КР4, ЗП2, ЗП3
17,3	9,4	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1, М2, КР2, КР1, Крив3, Крив1
19,3	9,6	ЗП1, Крив3, Крив1, КР2, КР1, Крив2, КР3, КР4, ЗП2, ЗП3, Пер1 Пер2 М1
20,0	10,9	ЗП2, ЗП1, ЗП3, КР4, КР3, М1, М2, КР2, КР1, Крив3, Крив1, Крив2, М2

За даними табл. 2 побудовані графіки вартості скорочення 1 хв часу руху поїзда з локомотивом ЧС4 і ЧС8 (маса поїзда 1000 т). Наявність часто розташованих бар'єрних місць (див. рис. 2), що утримують підвищення швидкості, не дає змоги повністю реалізувати потужність локомотива ЧС8, тому криві на рис. 4 майже співпадають.

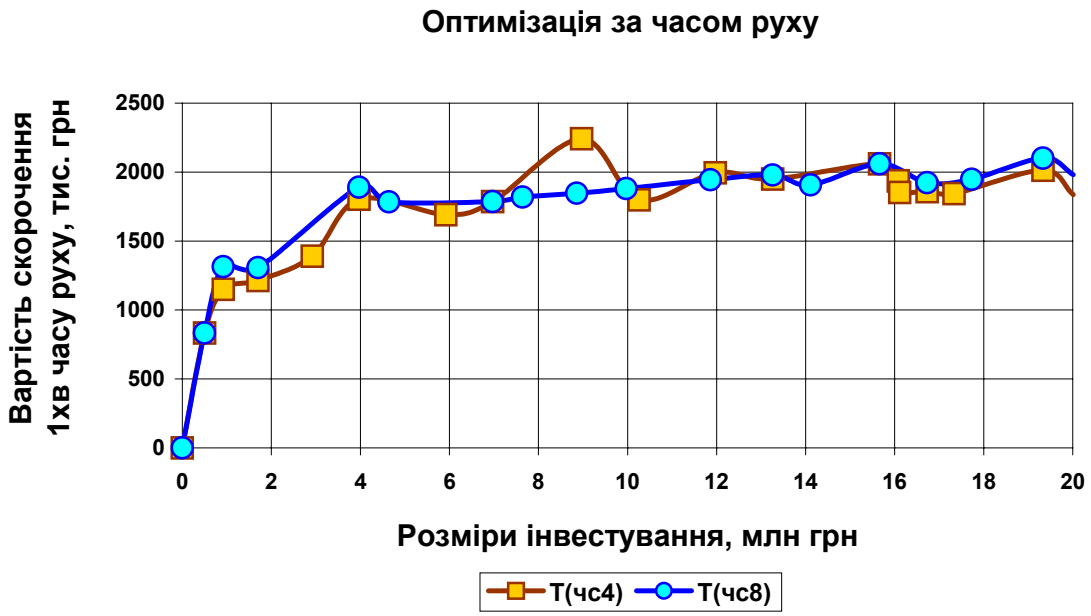


Рис. 4. Оптимізація за часом руху поїзда з локомотивом ЧС4 і ЧС8

У табл. 3 наведені результати оптимізації, коли як критерій розглядається не скорочення часу, а витрати механічної роботи сили тяги локомотива, що в кінцевому підсумку впливає на витрати електроенергії і вартість пробігу поїзда.

Перелік об'єктів, що наведений в табл. 2 і 3, відповідає рис. 2.

Таблиця 3

Оптимізація за механічною роботою локомотива

K, млн грн	ΔR_M, т·км	Найменування бар'єрних місць
0,4	3	ЗП2
1,6	46	ЗП2, ЗП1, ЗП3
4,8	111	ЗП2, ЗП1, ЗП3, М1, М2, Крив3
6,0	158	ЗП2, ЗП1, ЗП3, М1, М2, Крив3, Крив1
11,1	212	ЗП2, ЗП1, ЗП3, М1, М2, Крив3, Крив1, М2, Крив2, КР4
15,6	223	ЗП1, Крив3, Крив1, Крив2, ЗП2, ЗП3, Пер1, Пер2, М1, М2, М3, КР4, КР1
18,6	237	ЗП1, Крив3, Крив1, Крив2, ЗП2, ЗП3, Пер1, Пер2, М1, М2, М3, КР4, КР1, КР2
20,0	291	ЗП2, ЗП1, ЗП3, М1, М2, Крив3, Крив1, М2, Крив2, КР4, КР3, КР2, КР1

За даними табл. 3 побудовані графіки вартості 1 т·км механічної роботи сили тяги локомотива при руханні поїзда з локомотивом ЧС4 і ЧС8. Як випливає з графіків (рис. 5), вартість одиниці механічної роботи для більш потужного локомотива ЧС8 менша на 25…30 % при відповідних інвестуваннях.

Далі розглядається варіант тільки з локомотивом ЧС4. На рис. 6–8 показані залежності скорочення часу руху поїзда, економії механічної роботи сили тяги, електроенергії й вартості пробігу поїзда від розміру виділених на реконструкцію інвестицій. На цих же рисунках представлені розрахункові формули, що отримані за результатами апроксимації.

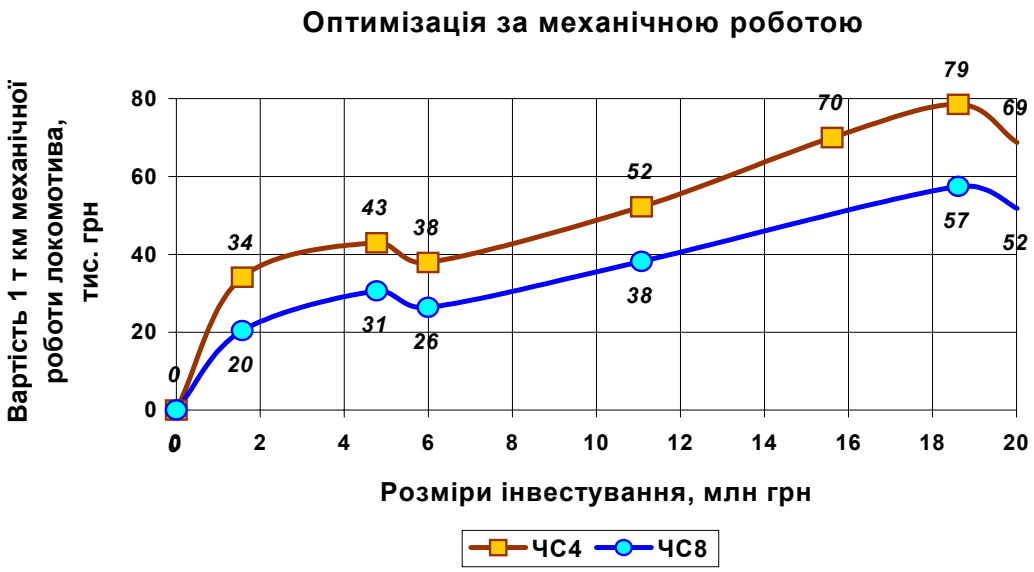


Рис. 5. Оптимізація за механічною роботою сили тяги локомотивів ЧС4 і ЧС8

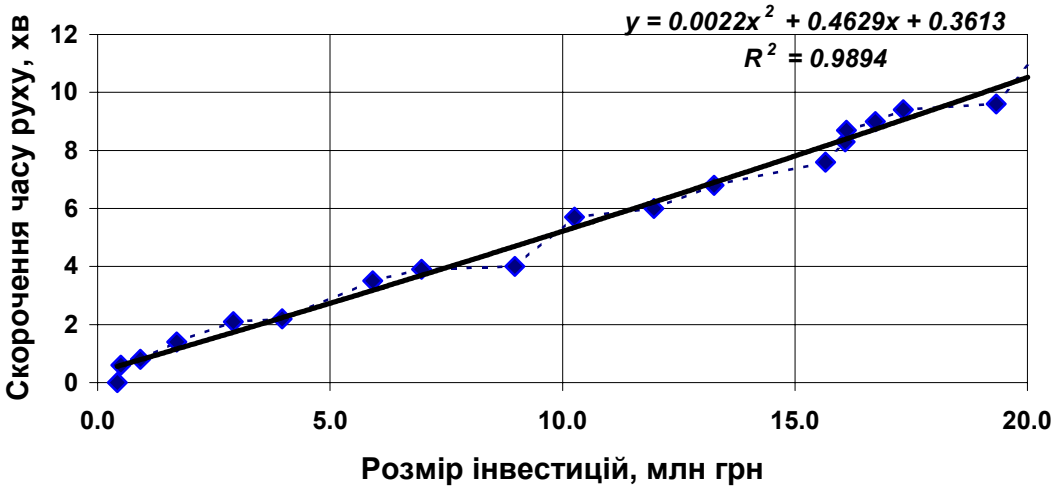


Рис. 6. Залежність скорочення часу руху від розмірів інвестицій на реконструкцію

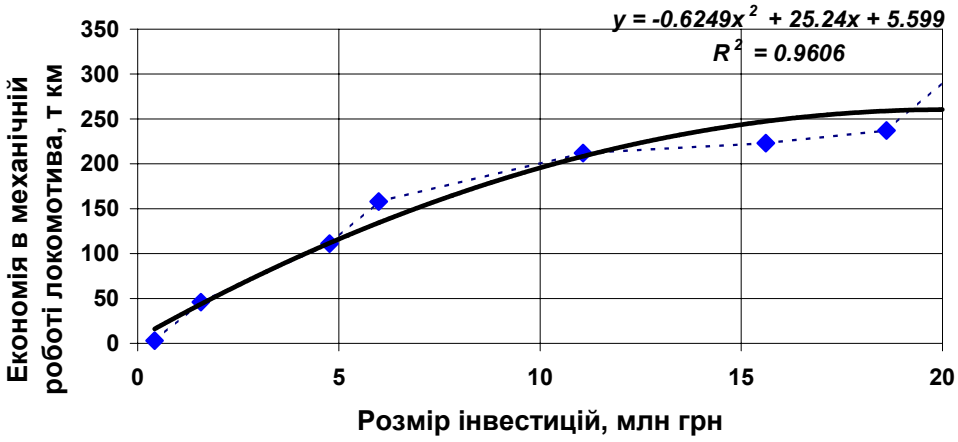


Рис. 7. Залежність економії в механічній роботі сили тяги локомотива від розмірів інвестицій на реконструкцію

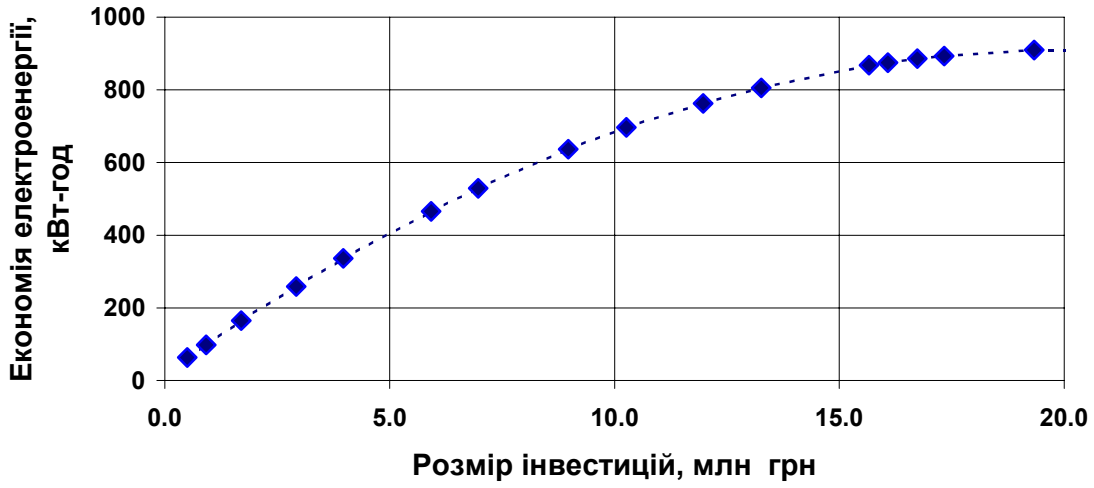


Рис. 8. Залежність економії електроенергії від проведених заходів з реконструкції дільниці, що виражається через розміри інвестицій

Експлуатаційні витрати, зв'язані з пробігом поїздів, пропорційні витратам енергії (e_1), пробігу (e_2) і часу руху з урахуванням простоїв поїздів (e_3):

$$e = e_1 + e_2 + e_3, \qquad (3)$$

де

$$e_1 = a_л R_л + a_c R_c + a_A A;$$

$$e_2 = La_{ns}10^{-3} + mLa_{ns}10^{-3} + (P+Q)La_{pl}10^{-6};$$

$$e_3 = t_{MH}a_{MH} + t_{Mh}a_{Mh} + mt_{nH}a_{nH}10^{-3}.$$

У доданків, що входять до формули (3): $a_л$, a_c, a_A, a_{ns}, a_{pl}, a_{MH}, a_{Mh}, a_{nH} – одиничні норми витрат на відповідний вимірник прийняті за даними [11] і відкориговані до курсу цін 2004 р.; $R_л$, R_c, A – відповідно механічна робота сили тяги локомотива, робота сил опору і витрати електроенергії, визначаються програмно при тягових розрахунках; t_{MH}, t_{Mh}, t_{nH} – відповідно час руху, простою локомотивів і роботи локомотивних бригад, руху і простою вагонів; m – кількість вагонів у поїзді.

Після проведення реконструкції експлуатаційні витрати зменшуються і досягається економія Δe, яка буде тим більшою, чим більше ліквідовано бар'єрних місць, що обмежували швидкість руху поїздів (рис. 9).

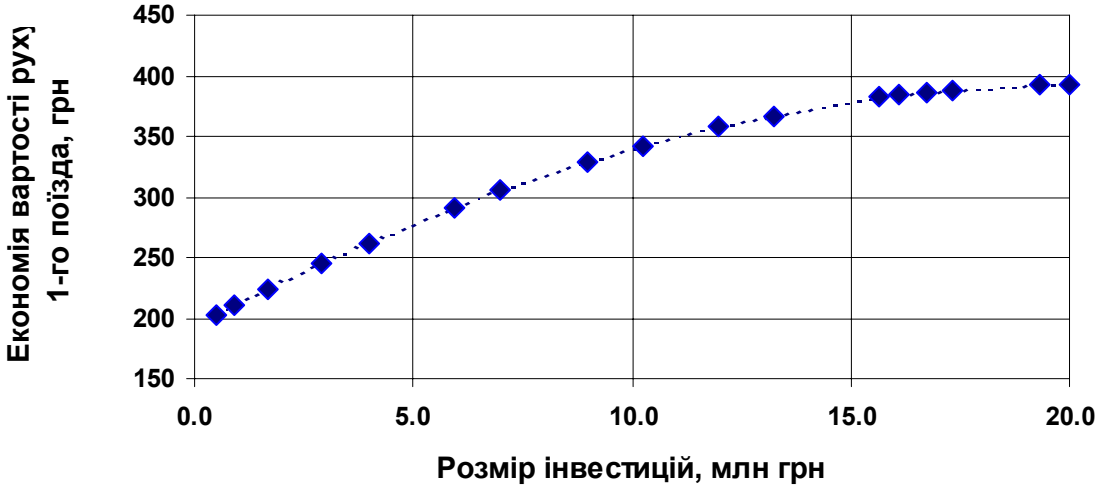


Рис. 9. Залежність економії вартості пробігу поїзда від розмірів інвестицій, що виділяються на реконструкцію дільниці

При відомій кількості поїздів можна визначити щорічну економію в експлуатаційних витратах ΔE_t, а потім і термін окупності інвестицій $T_{ок}$ (часовий період від початку реалізації проекту), за

який інвестиційні вкладення $K_{інв}$ покриваються економією в експлуатаційній діяльності:

$$\sum_{t=0}^{T_{ок}} \Delta E_t \eta_t = K_{інв}, \qquad (4)$$

де η_i – коефіцієнт дисконтування різночасових витрат.

Аналіз складових частин формули (4) показує, що при оптимізації може розглядатись і такий критерій.

Застосування нових підходів до оптимізації дозволяє як критерій використовувати різні показники в залежності від того, яка ставиться мета – економія часу руху чи витрат електроенергії, окупність інвестицій в заданий термін тощо.

Висновки

1. Різні методи оптимальної перебудови існуючої лінії для підвищення швидкості руху поїздів, які використовувались раніше, припускають, що критерій оптимізації адитивний, тобто складається із суми одержуваного ефекту на кожній ділянці. Однак традиційний розподіл лінії на ділянки станція – перегін – станція – …, який приймався в 90-х роках у цільовій комплексній програмі союзного значення «Прогрес», може бути прийнятий лише як наближений, оскільки сусідні ділянки в більшості випадків є залежними за швидкістю руху поїзда.

2. Інші способи розподілу лінії на ділянки, наприклад по кривій швидкості $V(S)$, припускають, що ділянки оптимізації є незалежними одна від одної за швидкістю руху поїздів, тобто наявність обмежень швидкості в межах даної ділянки не впливає на рівень швидкості на сусідніх з нею ділянках ліворуч і праворуч. Критерій оптимізації приймається також адитивним. Такий підхід вимагає розробки складної техніко-економічної моделі, щоб на кожному бар'єрному місці розглядати різні комбінації зняття обмежень швидкості, розраховувати для них потрібні капіталовкладення, визначати скорочення часу руху та інші експлуатаційні показники, що робить вирішення задачі надзвичайно трудомістким. До недоліків такого підходу слід віднести й те, що незалежні ділянки оптимізації призначаються по кривій швидкості пасажирського поїзда $V(S)$, положення якої не є постійним, тому що залежить від параметрів самого поїзда, напрямку руху й інших факторів.

3. Запропонований в даній роботі новий метод вибору оптимальної стратегії реконструкції ділянок залізничної лінії транспортних коридорів базується на принципово іншому підході, що виключає розподіл лінії на незалежні ділянки оптимізації, тому що алгоритм оптимізації містить, крім математичних методів, виконання тягових розрахунків з використанням реальних даних (файлів) про поздовжній профіль, план лінії й обмеження швидкості. Використання тягових розрахунків як складової методу оптимізації дозволило як основні критерії розглядати широке коло функцій корисності, таких як скорочення часу руху поїзда, зменшення механічної роботи локомотива чи витрат електроенергії, економії експлуатаційних витрат на рух поїзда.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гавриленков А. В., Иванов Г. Г., Макушкина Е. А. Оптимальная стратегия повышения скорости движения поездов // Межвуз. сб. науч. тр. / МИИТ, 1986. – Вып. 771. – С. 9–12.
2. Турбин И. В. К проблеме оптимизации постоянных устройств линейных транспортных объектов / Межвуз. сб. науч. тр. – МИИТ, 1981. – Вып. 688. – С. 17–22.
3. Копыленко В. А. Технико-экономическая модель задачи оптимального переустройства эксплуатируемой линии для повышения скорости поездов // Межвуз. сб. науч. тр. / МИИТ, 1986. – Вып. 771. – С. 50–66.
4. Джаббаров С. Т. Деление линии на участки для оптимизации переустройства при введении скоростного движения // Межвуз. сб. науч. тр. – Д., 1989. – С. 60–63.
5. Игнатова Ж. А., Карпов М. И., Матвиенко А. А. Влияние распределения локальных ограничений на повышение скоростей движения пассажирских поездов // Межвуз. сб. науч. тр. – Д., 1989. – С. 63–66.
6. Корженевич І. П., Курган М. Б., Савченко В. В. Деякі економічні аспекти впровадження швидкісного руху на залізницях України // Транспорт: Зб. наук. пр. ДІІТу. – Д., 2001. – Вип. 8. – С. 74–82.
7. Курган Н. Б. Выбор мероприятий, обеспечивающих повышение скорости при ограниченных капитальных вложениях // Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве: Межвуз. сб. науч. тр. – Д.: Арт-Прес, 1997. – Вып. 4. – С. 151–153.
8. Босов А. А. Применение функций множества в инженерных и экономических задачах // Транспорт: Зб. наук. пр. ДІІТу. – Д., 2002. – Вип. 12. – С. 20–29.
9. Курган М. Б. Розробка метода оптимальної перебудови ділянки залізниці для організації швидкісного руху поїздів // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – Вип. 1. – С. 66–73.
10. Венцель Е. С. Элементы динамического программирования. – М.: Наука, 1964.
11. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, станций и узлов. – М.: Оргтранcsстрой, 1988. – 468 с.

Надійшла до редколегії 02.02.04.

УДК 625.143.03

И. ПОВИЛАЙТЕНЕ, К. САКАЛАУСКАС, И. ПОДАГЕЛИС (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва)

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В КРИВЫХ НА БОКОВОЙ ИЗНОС НАРУЖНОГО РЕЛЬСА

У статті наведено дані про вплив геометричних параметрів залізничної колії в кривих на бічний знос зовнішньої рейки. Пропонується методика розрахунків додаткових витрат, необхідних для утримання та реконструкції кривих малого і середнього радіусів.

В статье приведены данные о влиянии геометрических параметров железнодорожного пути в кривых на боковой износ наружного рельса. Предлагается методика расчетов дополнительных расходов, необходимых для содержания и реконструкции кривых малого и среднего радиусов.

The article provides data on the influence of railway track geometric parameters in curves on lateral wear of the external rail and proposes a method of calculating the additional costs of maintenance and reconstruction of small and medium radius curves.

В Литве и других республиках, где строительство железных дорог производилось согласно техническим условиям Советского Союза, план линий нередко имел кривые малого радиуса. В 1939–1946 гг. нормативная документация СССР не регламентировала скорость движения поездов, поэтому при проектировании кривых, радиус которых не превышал 800 м, не предполагалось, что в будущем такие кривые могут ограничивать скорости движения [1]. В настоящее время ситуация кардинально изменилась, увеличились скорости движения поездов, в связи с чем приходится решать проблемы, касающиеся изменения плана железнодорожных линий, что требует больших затрат на их реконструкцию.

На основании геометрических параметров железнодорожных линий Литвы и соседних стран установлено, что в кривых, радиус которых больше 1200 м (их количество не превышает 17 %), существует возможность увеличивать скорости движения поездов до 140 км/час. Кривые, радиус которых равен 450…680 м, составляют более 36 %. Не менее 10 % составляют кривые, радиус которых равен 350…450 м. Такие линии требуют реконструкции, так как они препятствуют развитию высокоскоростного движения.

Серьезную проблему для скоростных магистралей в настоящее время представляют линии малого и среднего радиусов с кривыми $R < 1200$ м, так как из-за центробежных сил в кривых ограничивается скорость ($V_n = 4,6\sqrt{R}$). В зависимости от радиуса кривой увеличивается интенсивность бокового износа рельсов и возрастают затраты на ремонт и содержание пути. Этот фактор следует учитывать при проектировании плана новых линий или реконструкции старых. Может оказаться так, что соотношение эксплуатационных затрат и затрат на реконструкцию окажется не в пользу последних. В таком случае нет смысла реконструировать кривую. Поэтому анализ и исследование интенсивности бокового износа рельсов в кривых малого и среднего радиусов, а также затрат на эксплуатацию и содержание – актуальная проблема, имеющая научную основу.

Кривые в зависимости от величины радиуса классифицировали на кривые малого ($R \le 600$ м), среднего ($1600 \ge R > 600$ м) и большого ($R > 1600$ м) радиусов. В качестве объекта исследований был выбран ряд кривых малого и среднего радиусов. Исследования проводились в период с 01.06.2001 по 10.03.2003. На интенсивность бокового износа головки наружного рельса в кривых малого и среднего радиусов влияет множество факторов, однако, для исследования и анализа были выбраны лишь те, на которые можно влиять и которыми можно управлять: возвышение наружного рельса, ширина колеи в кривых, радиус кривых, тип рельсов и качество рельсовой стали. В процессе экспериментальных исследований измерялись ширина рельсовой колеи в кривых малого и среднего радиусов, возвышение наружного рельса, боковой износ рабочей грани головки наружного рельса, вертикальный износ головок наружного и внутреннего рель-

сов. Измерения производились в кривых малого и среднего радиусов по осям каждой десятой шпалы в 25 местах в кривых № 1–16 и в 35 местах в кривых № 17–19. На каждом этапе исследований, которые проводились в среднем через каждые пять месяцев, вышеуказанные технические параметры измерялись в одних и тех же фиксированных местах.

Полученные результаты, как и ожидалось, подтвердили тот факт, что наибольшее влияние на интенсивность бокового износа головки наружного рельса оказывает радиус кривых. Однако авторов в большей степени интересовало влияние отклонений от нормы ширины колеи и возвышения наружного рельса на интенсивность бокового износа головки наружного рельса. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1 и 2, где влияние возвышения наружного рельса выражено через непогашенное ускорение.

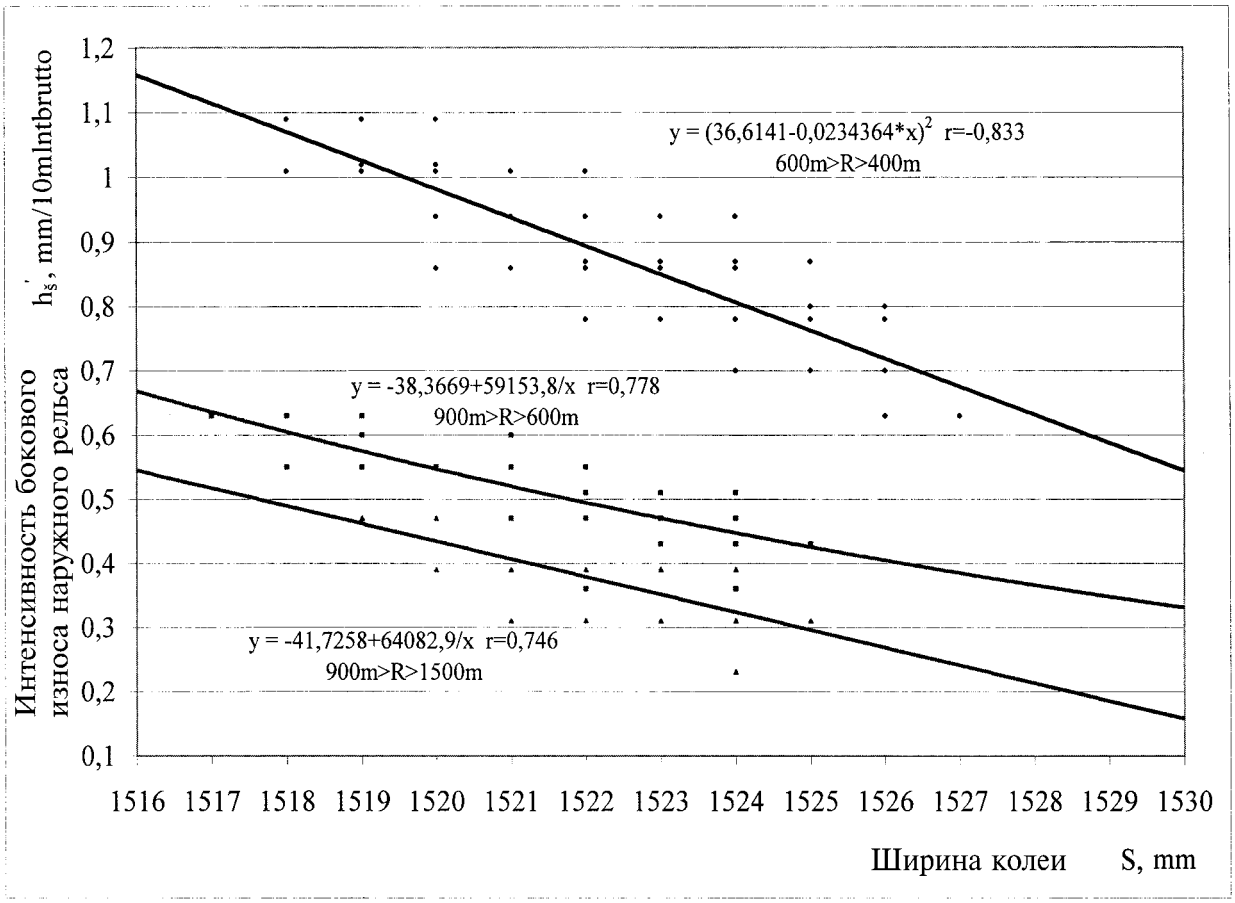


Рис. 1. Зависимость интенсивности бокового износа наружного рельса от ширины колеи

Анализ экспериментальных исследований позволяет уточнить действующие нормы геометрических параметров пути при устройстве и содержании кривых малого и среднего радиусов. В частности, предлагается уменьшить допустимое непогашенное ускорение до 0,6 м/сек^2 для пассажирских поездов с допустимыми отклонениями ±0,1 м/сек^2, при этом не менять величины допустимого ускорения для грузовых поездов 0,3 м/сек^2, что позволит уменьшить интенсивность бокового износа головки наружного рельса до 20 %. Одновременно предлагается ввести следующие параметры ширины колеи: 1524 мм в кривых, радиус которых $400\text{ м} \le 600\text{ м}$; 1530 мм, когда $400\text{ м} > R \ge 350\text{ м}$ и 1535 мм; когда $R < 350\text{ м}$.

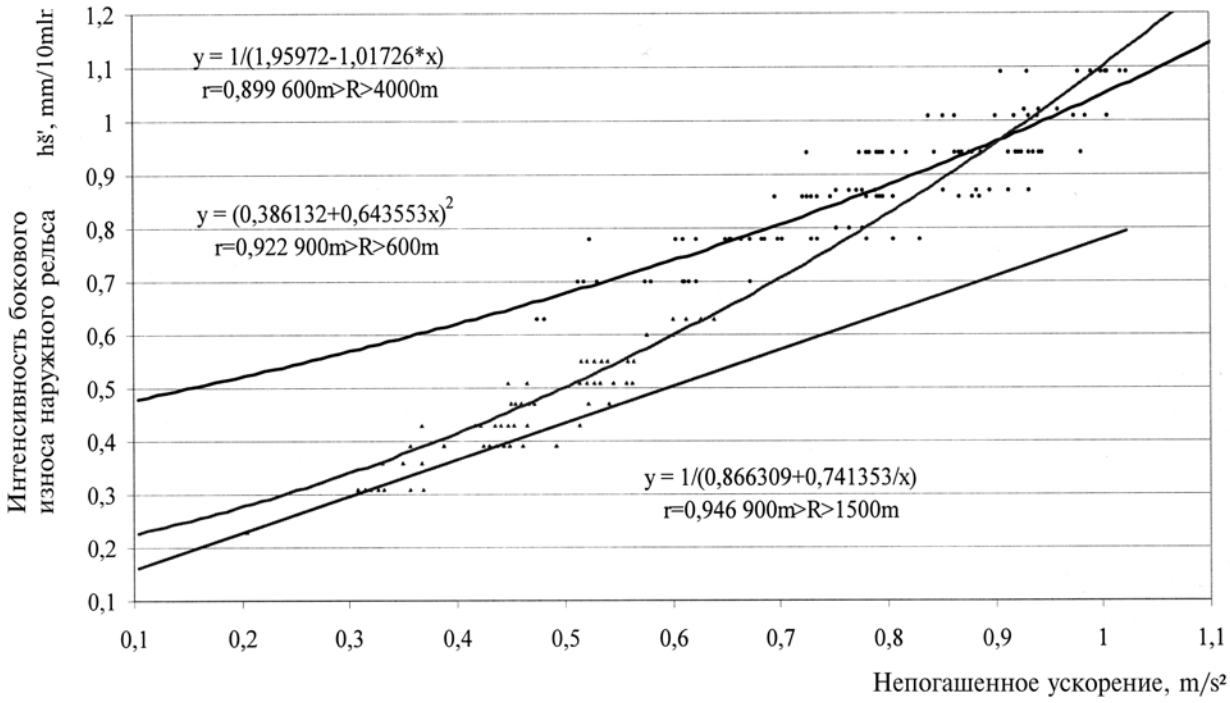


Рис. 2. Зависимость интенсивности бокового износа наружного рельса от величины непогашенного ускорения

Введение предлагаемых норм ширины колеи для кривых указанных радиусов позволит уменьшить интенсивность бокового износа от 28 до 40 %.

Условия движения поездов на кривых и прямых участках различаются по своему характеру. На прямых участках локомотив движется за счет тяговых сил, преодолевая целый ряд внешних сил сопротивления. На кривых участках в зависимости от радиуса кривой и скорости движения появляются дополнительные переменные центробежные усилия. Перед кривыми малого радиуса необходимо уменьшать скорость движения поездов, а после прохода кривой вновь увеличивать. На это расходуется дополнительная энергия. В кривых, длина которых зачастую составляет от 5 до 10 км, расходуется много дополнительной энергии [2]. Сопутствующие этому факторы отрицательно воздействуют на условия движения поездов и содержание пути. Затраты на преодоление негативных факторов при движении поездов в кривых малого и среднего радиусов предлагается определять по формуле

$$\Delta З = \left(R^1 - R\right)\left[365n\left(\frac{l_t}{60}k_t + l_m + k_m\right) + G\left(\gamma e_y + ak_p\frac{1,5\ \ l_p}{\omega}\right)\right]\cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

где R^1 – радиус кривой, не ограничивающий скорости движения поездов, м; R – радиус существующей кривой, м; n – количество поездов, скорость движения которых ограничивается радиусом кривой; l_t – стоимость потери одного часа пассажиром в пути; l_m – стоимость одного поезда; e_y – эксплуатационные расходы на перевозку 1 млн т·км брутто грузов; e_p – расходы, учитывающие износ рельсов; k_p – коэффициент, учитывающий параметры кривой; a – значение угла поворота; G – грузонапряженность, млн т брутто/год; ω – износ рельсов в процентах от допустимой величины; γ – коэффициент пропорциональности распределения эксплуатационных расходов.

Расчеты, производимые по формуле (1), не дают точной оценки затрат, однако, они могут с достаточной точностью установить разницу в затратах на реконструкцию кривых разного радиуса. Инвестиции A, необходимые для реконструкции кривых, ограничивающих скорость движения поездов, предлагается рассчитывать по формуле (2)

$$A > E\left(1+\eta\right)^t, \quad (2)$$

где E – дополнительные годовые расходы на эксплуатацию кривых, ограничивающих скорость движения поездов; η – коэффициент

дисконто; t – период времени, на который производится расчет.

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Современные условия эксплуатации железных дорог требуют пересмотра и научно обоснованного уточнения норм, регламентирующих геометрические параметры пути (ширина колеи, допустимые отклонения, возвышение наружного рельса) в кривых малого и среднего радиусов.

2. Предлагается методика расчетов дополнительных расходов, необходимых для содержания и реконструкции кривых малого и среднего радиусов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Л. Сакалаускас. Влияние развития норм проектирования железных дорог на скорость движения поездов. *Transportas* (Транспорт), XVI т., № 5, Вильнюс: Техника, 2001, С. 244–257 (на лит. яз.).
2. Л. Сакалаускас. Целесообразность пересмотра плана кривых железнодорожных линий при их реконструкции. *Transportas* (Транспорт), XIII т., № 1, Вильнюс: Техника, 1998, – С. 40–42 (на лит. яз.).

Поступила в редколлегию 02.02.04.

УДК 539.3 +531.1

А. А. БОСОВ, В. М. ИЛЬМАН (ДИИТ)

ДИНАМИКА КАЧЕНИЯ ТЕЛА ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ

Проведено аналіз динаміки руху тіла, яке котиться по горизонтальній деформівній основі. Для плоского випадку котіння типу О. Рейнольдса знайдені умови усталеного котіння тіла, показано, що можливе котіння без ковзання та буксування.

Дан анализ динамики движения тела, катящегося по горизонтальному деформируемому основанию. Для плоского случая качения типа О. Рейнольдса найдены условия установившегося качения тела и показано, что возможно качение без скольжения и буксования.

This article offers you the analysis of dynamics of moving rolling element along horizontal deforming base. For rolling, like O. Reinolds, was found the conditions of steady rolling of element and was demonstrated, that the rolling without towing and slipping are possible.

В результате исследований О. Рейнольдсом еще в 1876 г. установлено, что качение тела по горизонтальному основанию при установившемся движении неравномерное. Однако до сих пор механизм качения тела по горизонтальному деформируемому основанию исследуется многими авторами [1–3] на основе моделей О. Рейнольдса или Н. П. Петрова при равномерном движении. И, как правило, (в работе [2] это сделано) не указываются условия, при которых это движение возможно.

В данной работе показано, что процесс равномерного качения тела физически не реален и предлагается исследовать динамику качения при его неравномерном движении с учетом того, что в системах: колесо – рельс, тело – основание и прочих порождаемые силы в зоне контакта – результат как внутренних, так и внешних сил [4].

1. Уравнения движения и их анализ

Пусть под действием векторов крутящего момента $\vec{p}$ и силы тяги $\vec{s}$ по горизонтальному основанию катится тело вращения массой m, с угловой скоростью $\vec{\omega}$ и скоростью оси вращения $\vec{v}$. Тело контактирует с основанием по поверхности гладкого многообразия A, в каждой точке которого действуют касательный $\vec{\tau}$ и нормальный $\vec{\sigma}$ векторы. В свою очередь, последние порождают:

– вектор момента сопротивления перекатыванию тела

$$\vec{M} = \int_E \left(\vec{\sigma} + \vec{\tau}\right)_n \xi dE$$

от нормальных и касательных векторов $\vec{\tau}$ и $\vec{\sigma}$, распределенных по области E (E – проекция многообразия A на это основание);

– вектор от касательной проекции этих векторов

$$\vec{f} = \int_E \left(\vec{\sigma} + \vec{\tau}\right)_v dE ;$$

– реакцию момента верчения

$$F = \int_A \left(\vec{\tau}, \vec{\rho}\right) dA$$

точек многообразия A, расположенных на расстоянии радиуса-вектора $\vec{\rho}$ от центра верчения.

Уравнение движения тела представим выражением

$$L\left(\vec{v}, \vec{\omega}\right) = B\left(\vec{v}, \vec{\omega}, t\right) + 2F\left(t\right) + g , \qquad (1)$$

где $L\left(\vec{v}, \vec{\omega}\right) = m\left|\vec{v}\right|^2 + I\left|\vec{\omega}\right|^2$,

$$B\left(\vec{v}, \vec{\omega}, t\right) = 2\int_0^t \left(\left(\vec{p} - M, \vec{\omega}\right) + \left(\vec{s} - \vec{f}, \vec{v}\right)\right) dt ,$$

$$g = L\left(\vec{v}\left(0\right), \vec{\omega}\left(0\right)\right).$$

Используя принцип неподвижной точки можно показать, что в классе ограниченных интегрируемых функций решение уравнения (1) относительно $\vec{v}$ существует, если $\vec{\omega}$ из того же класса и наоборот.

Определение 1. Качение тела назовем равномерным для уравнения (1), если $\vec{v}\left(t\right) = \vec{c}_1$ и $\vec{\omega}\left(t\right) = \vec{c}_2$.

Лемма 1. Равномерное качение тела для уравнения (1) возможно тогда и только тогда, когда

$$\left(\vec{p}(t)-\vec{M}(t),\vec{\omega}(t)\right)+$$

$$+\left(\vec{s}(t)-\vec{f}(t),\vec{v}(t)\right)+\int_A\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\tau},\vec{\rho})\,dA=0\,. \quad (2)$$

Доказательство. Предположим, что $\vec{v}(t)=\vec{c}_1$ и $\vec{\omega}(t)=\vec{c}_2$, $\forall t\ge 0$, то из уравнения (1) имеем

$$B(\vec{c}_1,\vec{c}_2,t)+F(t)=0$$

или

$$\left(\vec{p}(t)-\vec{M}(t),\vec{c}_2\right)+\left(\vec{s}(t)-\vec{f}(t),\vec{c}_1\right)+\frac{d}{dt}F(t)=0\,.$$

Так как на границе многообразия ∂A $\vec{\tau}\big|_{\partial A}=0$, $\forall t\in R$, тогда получим условие (2).

Пусть теперь имеет место условие (2). Подставив – (2) в выражение оператора B и изменив порядок интегрирования, получим $B(\vec{v},\vec{\omega},t)=-F(t)$, $\forall t\ge 0$.

Следовательно, уравнение (1) преобразуется к виду

$$L\left(\vec{v}(t),\vec{\omega}(t)\right)=L\left(\vec{v}(0),\vec{\omega}(0)\right).$$

Условие (2) в частных случаях упрощается.

Следствие 1. Если касательный вектор $\vec{\tau}$ стационарный, то имеет место условие равномерного качения

$$\left(\vec{p}(t)-\vec{M}(t),\vec{\omega}(t)\right)+\left(\vec{s}(t)-\vec{f}(t),\vec{v}(t)\right)=0\,. (3)$$

При плоском движении в декартовой системе координат (O, x, y), с осью x совпадающей с границей недеформированного основания, уравнение (1) принимает вид [5]

$$L(\dot{x},\dot{\varphi})=B(\dot{x},\dot{\varphi},t)+\beta F(t)+g\,, \quad (4)$$

где

$$B(\dot{x},\dot{\varphi},t)=2\int_0^t\left[-M(t)\dot{\varphi}+\left(s(t)-f(t)\right)\dot{x}\right]dt\,,$$

$\beta=+1$ – для ведомого тела;

$$B(\dot{x},\dot{\varphi},t)=2\int_0^t\Big[\left(p(t)-\right.$$

$$\left.-M(t)\right)\dot{\varphi}-\left(s(t)-f(t)\right)\Big]\dot{x}dt\,,$$

$\beta=-1$ – для ведущего тела;

$$\dot{x}=v\,,\quad \dot{\varphi}=\omega\,,\quad M(t)=\int_{x_1}^{x_2}\left(|\vec{\sigma}_y|+|\vec{\tau}_y|\right)xdx\,,$$

$$f(t)=\int_{x_1}^{x_2}\left(|\vec{\sigma}_x|+|\vec{\tau}_x|\right)dx\,,$$

$$F(t)=2\rho\int_{l_1}^{l_2}|\vec{\tau}|dx\,;$$

$l_i=l_i\left(x_i(t)\right)$, $x_i=x_i(t)$ – граничные точки области контакта.

Следствие 2. Равномерное качение тела для уравнения (4) возможно если:

– для ведомого тела

$$M(t)\dot{\varphi}-\left(s(t)-f(t)\right)\dot{x}=\rho\int_{l_1}^{k_2}\frac{\partial}{\partial t}\left|\vec{\tau}(x,t)\right|dx\,; \quad (5)$$

– для ведущего тела

$$\left(p(t)-M(t)\right)\dot{\varphi}-\left(s(t)-f(t)\right)\dot{x}=$$

$$=\rho\int_{l_1}^{l_2}\frac{\partial}{\partial t}\left|\vec{\tau}(x,t)\right|dx\,. \quad (6)$$

Очевидно, при условиях (2), (3), (5), (6) имеем идеализированное качение тела и сколь угодно малые изменения параметров в системе тело – основание приведут к изменению режима равномерного движения тела. Таким образом, из леммы 1 для уравнений (1), (4) справедлива теорема.

Теорема 1. Система движения $\left(R^+,B\right)$, описываемая уравнением (1), при равномерном качении структурно не устойчива.

2. Установившееся движение тела

Определение 2. Процесс качения тела назовем установившимся, если существуют постоянные векторы $\vec{V}$, $\vec{\Omega}$ и числа ε_1, ε_2 такие, что $\left|\vec{V}-\vec{v}(t)\right|<\varepsilon_1$ и $\left|\vec{\Omega}-\omega(t)\right|<\varepsilon_2$, $\forall t\ge 0$.

Очевидно следующее:

Свойство 1. Равномерное, периодическое, субпериодическое качения тела установившиеся.

Свойство 2. Если вектор-функции $\vec{v}$ и $\vec{\omega}$ равномерные почти периодические [6], то движение тела – установившееся.

Доказательство. Обозначим через $\vec{z}$ любую из функций $\vec{v}$ или $\vec{\omega}$. Так как $\vec{z}$ почти периодическая функция, то $\left|\vec{z}(t+\delta)-\vec{z}(t)\right|<\varepsilon$, $\forall t\ge 0$ и так как

$$\left|\vec{z}(t+\delta)-\vec{z}(t)\right|=\left|\vec{z}(t+\delta)-\vec{D}-\left(\vec{z}(t)-\vec{D}\right)\right|\ge$$

$$\ge\left\|\vec{z}(t+\delta)-\vec{D}\right|-\left|\vec{z}(t)-\vec{D}\right\|,$$

то

$$\left\|\vec{z}(t+\delta)-\vec{D}\right|-\left|\vec{z}(t)-\vec{D}\right\|<\varepsilon\,.$$

Тогда из ограниченности вектора $\bar{z}$ [6] следует установившееся движение тела.

В дальнейшем, на примере плоского движения, рассматривается установившееся качение тела.

Пусть скорость оси тела $\dot{x}$ и его угловая скорость $\dot{\varphi}$ связаны зависимостью типа О. Рейнольдса

$$\dot{x} + \eta V = \rho\dot{\varphi}, \tag{7}$$

где V – средняя скорость оси тела, η – коэффициент псевдоскольжения ($\eta < 0$ – для ведомого тела, $\eta > 0$ – для ведущего тела).

Из соотношения (7) следует, установившийся режим движения возможен, если только ему удовлетворяет скорость $\dot{x}$ или – $\dot{\varphi}$. Кроме того, зависимость (7) не противоречит условиям скольжения ($\dot{\varphi} = 0,\ \dot{x} = const$) и буксования тел ($\dot{\varphi} = const$, $\dot{x} = 0$).

Подставив зависимость (7) в уравнение (4) и обратив оператор Вольтерра, сведем задачу о нахождении режима качения тела к решению трех последовательных задач Коши:

$$\begin{cases} \dot{u} = \mu(t)\left(b \pm \sqrt{b^2 + u + k(t)}\right), \\ u(0) = 0; \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} \dot{z} = b \pm \sqrt{b^2 + u + k(t)}, \\ z(0) = z_0; \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \dot{x} + \eta V = \rho\varphi, \\ \bar{z}(0) = \bar{z}_0, \end{cases} \tag{10}$$

где для ведомого тела $z = \varphi$, $\bar{z} = x$,

$$b = \frac{m\rho}{a}\eta V, \quad a = m\rho^2 + I,$$

$$\mu(t) = \frac{2}{a}\left(-M(t) + \rho\left(s(t) - f(t)\right)\right),$$

$$k(t) = \frac{1}{a}\left[F(t) - 2\eta V\int_0^t \left(s(t) - f(t)\right)dt\right.;$$

для ведущего тела $z = x$, $\bar{z} = \varphi$,

$$b = \frac{I}{\rho^2 a}\eta V, \quad a = m + \frac{I}{\rho^2},$$

$$\mu(t) = \frac{2}{a\rho}\left[p(t) - M(t) - \rho\left(s(t) - f(t)\right)\right],$$

$$k(t) = \frac{1}{a}\left[-F(t) + 2\eta\frac{V}{\rho}\int_0^t \left(p(t) - \right.\right.$$

$$\left.\left. -M(t)\right)dt + g - I\left(\frac{\eta V}{\rho}\right)^2\right].$$

Очевидно, качение тела будет установившимся, если решение задачи (8) ограничено. В частности, равномерное движение тела, соответствующее чистому качению ($\eta = 0$), по теореме 1 структурно не устойчиво.

Найдем условия, при которых возможно установившееся ($\mu(t) \neq 0$) движение тела.

3. Условия существования установившегося качения тела

Рассмотрим уравнение

$$\dot{u} = r(u,t), \tag{11}$$

в котором $r(u,t) = \mu(t)P(u,t)$ и

$$P(u,t) = b + \alpha\sqrt{b^2 + u + k(t)}, \quad \alpha = \pm 1,$$

$$b^2 + u + k(t) > 0.$$

Уравнение (11) имеет равновесное состояние $u_1 = -k(t)$ при $b < 0$, $\alpha = 1$ (ведомое тело) и при $b > 0$, $\alpha = -1$ (ведущее тело).

Предположим, что функции μ, k ограничены $\forall t \in R$, тогда функция r ограничена по t в окрестности равновесного состояния U_u и $r \in C^\infty(U_u)$ по переменной u. Следовательно, для функции P в окрестности U_u справедливо разложение

$$P(u,t) = \alpha\left(\frac{1}{2|b|}(u - u_1) - 1/4\left(b^2 + \right.\right.$$

$$\left.\left. (1 - \vartheta)u_1 + \vartheta u_2 + k(t)\right)^{-3/2}(u - u_1)^2\right),$$

где $\vartheta \in (0,1)$, $u_2 \in U_u$.

Тогда имеет место очевидная лемма.

Лемма 2. $\left|P(u,t)\right| \le C\left(\left|u - u_1\right| + \left|u - u_1\right|^2\right)$.

Рассмотрим задачу

$$\begin{cases} \dot{u} = \alpha\mu(t)u, \\ u(t_0) = u_0, \end{cases} \tag{12}$$

где μ ограниченная и интегрируемая на отрезке $[t_0, t]$ функция.

Лемма 3. Если $\alpha\int_0^t \mu(t)dt < 0$, то решение задачи (12) ограничено

$$\exp\left(-a_1(t-t_0)\right) \le |u(t)| \le \exp\left(-a_2(t-t_0)\right),$$

$$a_i > 0. \qquad (13)$$

Доказательство. Пусть

$$h(t) = \alpha\int_{t_0}^t \mu(t)dt < 0.$$

Так как функция μ ограничена и $h(t) < 0$, то $-a_1 \le \alpha\mu(t) \le a_0$, $t > t_0$, $a_1 > 0$. Следовательно,

$$-a_1(t-t_0) \le h(t) \le a_0(t-t_0),$$

$$h(t) = \phi(t-t_0) < 0, \quad -a_1 \le \phi \le a_0.$$

Для случая $a_0 < 0$ положим $a_0 = -a_1$, тогда

$$-a_1(t-t_0) \le h(t) \le -a_2(t-t_0). \qquad (14)$$

Если $a_0 \ge 0$, то выбрав на интервале $[\phi, a_0 | \phi < 0]$ число $-a_2 \ge \phi$, такое что $a_2 > 0$, получим соотношение (14).

Из выражения (14) имеем

$$\exp\left(-a_1(t-t_0)\right) \le \exp\left(h(t)\right) \le \exp\left(-a_2(t-t_0)\right)$$

и для решения $u(t)$ задачи (12) – неравенство (13).

Теорема 2. Решение задачи Коши (12) асимптотически устойчиво по Ляпунову тогда и только тогда, когда

$$\alpha\int_{t_0}^t \mu(t)dt < 0.$$

Доказательство теоремы основано на лемме 3 и проводится по схеме теоремы 3.3 работы [7].

Теорема 3. Если в окрестности равновесного состояния уравнения (11) выполняется лемма 2 и условия теоремы 2 для его линеаризированного уравнения, то равновесное решение уравнения (11) асимптотически устойчиво [7].

Из теоремы 3 можно получить важные следствия.

Следствие 3. Пусть функции μ и k периодические с периодом T, тогда периодическое решение задачи (8) устойчиво, если мультипликатор [8]

$$\lambda = \exp\left(\alpha\int_0^T \mu(t)dt\right) < 1$$

или показатель Флоке [9]

$$\kappa = \frac{\alpha}{T}\int_0^T \mu(t)dt < 0.$$

Рассмотрим теперь случай почти периодических функций μ и k.

Лемма 4. Для почти периодических функций μ и k существует почти периодическое решение уравнения (11).

Доказательство. Функция $P(u,t)$ равномерно почти периодическая, так как она почти периодическая по переменной t и удовлетворяет условию Гельдера по u с показателем $1/2$. Потому правая часть нелинейного уравнения (11) почти периодическая по t равномерно относительно значений u из каждого интервала $|u| \le n$.

Тогда из принципа неподвижной точки [10, с. 152] следует существование почти периодического решения уравнения (11).

Для линейного уравнения

$$\dot{u} = \alpha\mu(t)u + \xi(t) \qquad (15)$$

с почти периодическими функциями μ и ξ справедлива теорема Д. А. Массера [10].

Теорема 4. Решение уравнения (15) в классе почти периодических функций существует и единственно тогда и только тогда, если среднее значение

$$\lim_{\delta\to\infty}\frac{\alpha}{\delta}\int_0^\delta \mu(t)dt \ne 0.$$

Исходя из леммы 4 и теоремы 4, получим из теоремы 3 еще одно следствие.

Следствие 4. Равновесное почти периодическое решение задачи (8) устойчиво, если

$$\lim_{\delta\to\infty}\frac{\alpha}{\delta}\int_0^\delta \mu(t)dt < 0.$$

Теорема 5. Установившееся движение тела возможно, если решение задачи (8) устойчиво по Ляпунову.

Доказательство. В области устойчивости решений задачи (8) для заданных величин $\varepsilon > 0$ и $\delta(\varepsilon) > 0$ выберем начальное условие $u(0) = u_0$ так, чтобы $|u_0| < \delta$ и $|u(t) - u_0| < \varepsilon$.

Так как функция k ограниченная, то пусть $|k(t)| < N, \forall t \in R$ и $K = V|\Omega$. Тогда из выражения задачи (9) получим оценку

$$|\dot{z}(t) - K| \le |b - K| + \sqrt{b^2 + \varepsilon + \delta + N},$$

из которой, в соответствии с определением 2, следует, что движение установившееся.

4. Анализ и результаты решения задач (8), (9), (10)

На основе результатов решения задач (8), (9), (10) можно сделать некоторые замечания.

Функции μ и k определяются как параметрические семейства системой тело – основание.

Замечание 1. Условия следствия 4 и его частного случая – следствия 3 задают параметрическую область устойчивых решений, в которой существуют (теорема 5) такие значения параметров семейства, что решения будут установившимися в смысле определения 2.

Замечание 2. Равновесные состояния задачи (8) являются точками скольжения или буксования катящегося тела. Причем кратность точек скольжения (буксования) зависит от критических состояний функций μ и k. В случае невырожденных равновесных состояний при установившемся качении тело проходит через пары устойчивых и неустойчивых точек движения $z(t), t \in [t_1, t_2]$.

Замечание 3. Множество равновесных состояний уравнения (8) определяет край параметрического многообразия скольжения (буксования).

На рис. 1–3 показаны некоторые сечения края параметрического многообразия скольжения ведомого тела, для которого

$$s(t) = (1 + \sin \gamma t)s,$$

$$f(t) = (1 + \sin(\gamma t + \varepsilon))f,$$

$$M(t) = M, \quad F(t) = F,$$

$$\frac{m\rho}{a} \in (1/2, 1), \quad \alpha\rho s(1 - f/s - M/s\rho) < 0.$$

Рис. 1 отражает зависимость $\frac{s\rho}{a\dot{\varphi}_0}$ от ε: 1) $T = 2$, 2) $T = 4$, если $f/s = 0{,}9$; $\frac{M}{s\rho} = 0{,}3$.

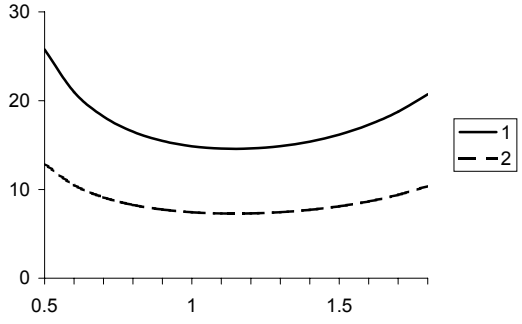


Рис. 1

Рис. 2 – зависимость $\frac{s\rho}{a\dot{\varphi}_0}$ от f/s: 1) $T = 3$, 2) $T = 4$, если $\frac{M}{s\rho} = 0.2$; $\varepsilon = 1$.

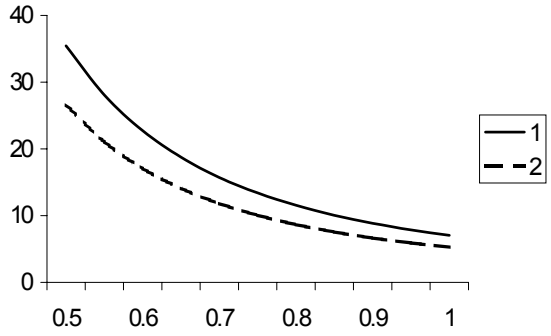


Рис. 2

Рис. 3 – зависимость $\frac{V}{\rho\dot{\varphi}_0}$ от $\frac{M}{s\rho}$: 1) $\frac{f}{s} = 0{,}7$, 2) $\frac{f}{s} = 0{,}9$, если $T = 4$, $\varepsilon = 1$.

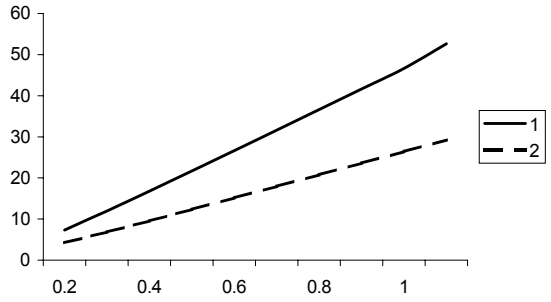


Рис. 3

Как видно из рисунков, частота приложения силы тяги влияет на значения границы скольжения, увеличение момента сопротивления перекатывания тела поднимает граничные значения скорости его оси, это согласуется с практическими результатами о том, что более нагруженные тела при качении изнашиваются меньше, чем менее нагруженные.

Замечание 4. Один из параметров системы тело – основание определяется через среднее значение скорости оси тела

$$\lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{x} dt = V.$$

Например, из зависимости (7) найдем коэффициент псевдоскольжения

$$\eta = \frac{\rho}{V} \lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\tau} (\varphi(\tau) - \varphi(0)) - 1.$$

Поэтому имеем следующее:

Следствие 5. Для ведомого тела $\eta < 0$ закон установившегося вращения ниже линейного $\varphi(t) < t$, а для ведущего – $\eta > 0$ выше $\varphi(t) > t$.

Замечание 5. При постоянных внешних силах и постоянных величинах: $M(t)$, $f(t)$ и $F(t)$ – установившегося, за исключением равномерного, движение тела невозможно [5].

Таким образом, реально возможное установившееся качение тела по горизонтальному основанию происходит по нелинейному закону движения. О равномерном же качении тела можно говорить только как о математическом объекте, существующем при определенных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ишлинский А. Ю. Прикладные задачи механики. Кн. 2. – М.: Наука, 1986. – 416 с.
2. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, 1980. – 304 с.
3. Гольдштейн Р. В., Зазовский А. Ф., Спектор А. А., Федоренко Р. П. Решение вариационными методами пространственных контактных задач качения с проскальзыванием и сцеплением // Успехи механики. Т. 5. Вып. ¾. 1982. – С. 61–102.
4. Голубенко А. Л. Сцепление колеса с рельсом. – К.: Віпол, 1993. – 448 с.
5. Ильман В. М. О качении колеса при установившемся движении экипажа // Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту: Зб. наук. праць / ДИИТ. – Д.: Січ, 1998. – С. 71–81.
6. Гутер Р. С., Кудрявцев Л. Д., Левитан Б. М. Элементы теории функций. – М.: Физматгиз, 1963. – 244 с.
7. Зубов В. И. Лекции по теории управления. – М.: Наука, 1975. – 498 с.
8. Арнольд В. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М.: Наука. 1984. – 272 с.
9. Йосс Ж., Джозеф Д. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций. – М.: Мир, 1983. – 301 с.
10. Красносельский М. А., Бурд В. Ш., Колесов Ю. С. Нелинейные почти периодические колебания. – М.: Наука, 1970. – 352 с.

Поступила в редколлегию 22.09.03.

УДК 519.86:658.011.22:656.2

А. А. БОСОВ (ДИИТ), Г. Н. КОДОЛА (УГХТУ)

ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДОРОГ УКРАИНЫ И УКРЗАЛІЗНИЦІ В ЦЕЛОМ ЗА ПЕРИОД 1991–2001 ГГ.

Проведено аналіз вибору структури математичної моделі, яка описує роботу з перевезення вантажів окремих доріг України і Укрзалізниці.

Проведен анализ выбора структуры математической модели, описывающей работу по перевозке грузов отдельных дорог Украины и Укрзалізниці.

The authors have performed an analysis of selection of a mathematical model, describing freight operations on separate railways of Ukraine and on Ukrzaliznytsia (all Ukrainian railways) as a whole.

Анализ деятельности дорог Украины в современных условиях важен при организации работы железнодорожного транспорта. От него в значительной мере зависит эффективное использование технических средств дороги, рациональное распределение вагонного и локомотивного парков, экономия материальных средств и времени на перевозку грузов, усовершенствование технологий работы транспорта и т. д.

При проведении анализа следует определить метод построения математической модели [1] и ряд взаимосвязанных факторов [4–5] для описания данной модели, которая позволит с минимальной погрешностью провести прогноз.

Проведенный анализ [2] показал динамику процесса перевозок на дорогах Украины за период независимости (1991–2001 гг.). Математические методы прогнозирования пассажирских потоков [1]. Для проведения эконометрического анализа представлена данная работа.

Следуя основной задаче эконометрического анализа [3], в данной работе предложены математические модели, описывающих работу отдельных дорог Украины и Укрзалізниці в целом.

При построении моделей использовалась информация о среднесуточных показателях деятельности дорог Украины и Укрзалізниці по годам за период 1991–2001 гг. [2]. В данной работе представлен количественный анализ динамики каждого из показателей, что не дает возможности определить взаимосвязь этих показателей, влияние одного показателя на другой, выбора из них существенных для описания деятельности дорог.

При моделировании ограничимся среднесуточными показателями, описывающими деятельность по грузовым перевозкам. В качестве исходных показателей взяты: грузооборот (млн т·км), количество загруженных вагонов (тыс.), количество разгруженных вагонов (тыс.), оборот груженого вагона (сутки), простой груженого вагона на одной технической станции (часов) и др.

При выборе структуры математической модели, описывающей грузооборот, исходили из корреляционного и автокорреляционного анализа и получили рациональную структуру в виде [1; 4]:

$$x_1(t+1) = ax_1(t) + bx_2(t) + cx_3(t) + d\,, \qquad (1)$$

где $x_1(t+1)$ – прогнозируемый грузооборот за период $t+1$, млн т·км; $x_1(t)$ – фактический грузооборот за период t, млн т·км; $x_2(t)$ – количество загруженных вагонов за период t, тыс.; $x_3(t)$ – количество разгруженных вагонов за период t, тыс.

Рассмотрим подробнее на примере Приднепровской железной дороги определение структуры и параметров модели (1). С помощью корреляционного анализа было установлено, что наиболее значимыми для прогноза грузооборота на каждый следующий год являются такие показатели: грузооборот за предыдущий год, количество загруженных вагонов, количество разгруженных вагонов, объем отправленных грузов, потребная доля электротяги в грузообороте. Заметим, что выполненный анализ с помощью программы Statistika коэффициента детерминации [5] показал: при включении в модель дополнительных переменных (объем отправленных грузов, потребная доля электротяги в грузообороте) приводит к малому приросту коэффициента детерминации. Автокорреляционный анализ для выбранных показателей (рис. 1) показал, что структура динамической модели должна учитывать события с лагом в один год.

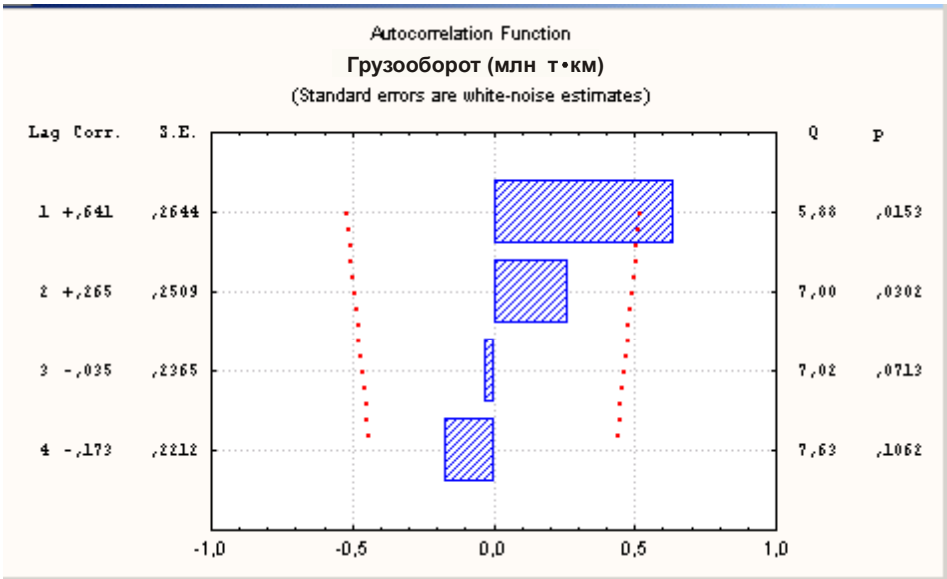


Рис. 1. Автокорреляционная функция для грузооборота

Нахождение коэффициентов a, b, c, d в модели (1) выполнялось по методу наименьших квадратов, в явном виде получили следующую зависимость:

$$x_1(t+1) = 2{,}0049 \cdot x_1(t) + 9{,}0861 \cdot x_2(t) - \\ -40{,}2292 \cdot x_3(t) - 0{,}0501. \quad (2)$$

На рис. 2 представлены рассчитанные значения грузооборота по модели (2).

Максимальная относительная погрешность составляет – 10,4 % (для 1995 г.).

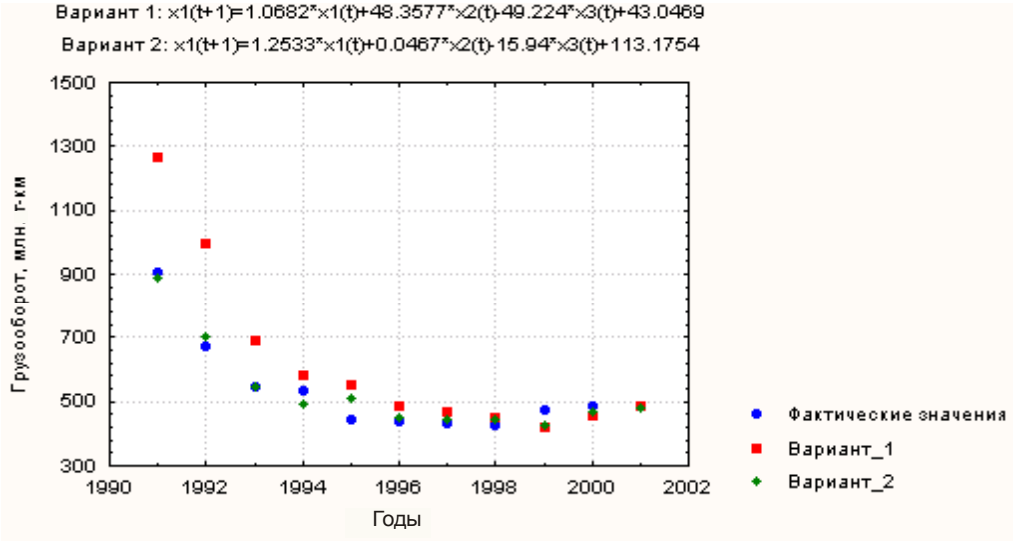


Рис. 2. Изменение грузооборота по годам и вычисленное по модели (1) на примере Приднепровской железной дороги

Если рассмотреть в качестве исходной информации среднесуточные данные по месяцам с января 2001 по ноябрь 2002 г. [6] по Приднепровской железной дороге, то, как видно из табл. 1, построенная модель прогнозирует с максимальной погрешностью 11 % (для марта 2002 г.).

Таблица 1

Месяц	Грузооборот фактический	Грузооборот рассчитанный	Относительная погрешность, %	Грузооборот фактический	Грузооборот рассчитанный	Относительная погрешность, %
	2001			2002		
Январь	107,60	107,60	0,000	96,90	96,90	0,000
Февраль	104,10	103,48	0,006	115,60	109,66	0,051
Март	112,10	109,44	0,024	115,70	128,47	0,110
Апрель	115,90	122,36	0,056	121,70	126,46	0,039
Май	110,70	115,70	0,045	126,00	127,33	0,011
Июнь	109,30	108,39	0,008	122,30	131,02	0,071
Июль	110,60	104,68	0,054	118,40	119,58	0,010
Август	108,20	108,19	0,000	118,10	116,69	0,012
Сентябрь	110,80	108,31	0,022	121,70	121,02	0,006
Октябрь	111,30	114,43	0,028	128,10	133,17	0,040
Ноябрь	110,60	104,28	0,057	131,60	138,87	0,055
Декабрь	101,90	112,22	0,101		141,86	
Всего за год	**109,50**	**114,03**	**0,041**	**119,65**	**119,96**	**0,003**

Прогноз среднесуточного грузооборота на 2002 г. по Приднепровской железной дороге составляет 119,96 млн т·км. По статистическим данным, представленным в [7], среднесуточное значение грузооборота на 2002 г. по Приднепровской железной дороге составляет 120,77 млн т·км. Построенная модель позволила спрогнозировать грузооборот на 2002 г. с погрешностью 0,67 %.

По аналогии, построим модели (1) для каждой дороги Украины, сведем результаты в табл. 2.

Таблица 2

Дорога	A	B	C	D	Максимальная погрешность, %
Приднепровская	2,00490	9,08610	–40,22920	–0,05010	10,4
Донецкая	1,22020	–0,23250	–11,36300	39,05490	7,7
Одесская	0,28921	0,63737	10,37589	43,35016	8,7
Львовская	–1,24347	12,23820	18,01102	59,36410	12,7
Южная	1,21340	78,93020	–87,75600	–26,86360	28,2
Юго-Западная	–0,43800	189,02200	–127,54600	89,59300	12,3

Максимальная погрешность от фактических данных составляет 28,2 % для Южной дороги.

Для построения модели по всей Укрзалізниці воспользуемся двумя вариантами:

Расчет коэффициентов модели (1) выполняем по формулам:

$$A=\sum_{i=1}^{n}|a_i|;\quad B=\sum_{i=1}^{n}|b_i|;\quad C=\sum_{i=1}^{n}|c_i|;\quad D=\sum_{i=1}^{n}|d_i|,$$

где n – количество дорог, $n=6$.

Расчет коэффициентов модели (1) выполняем с использованием множественной регрессии на основе фактических данных. Результаты сведем в табл. 3.

График фактических и рассчитанных значений по вариантам (1) и (2) представлен на рис. 3.

Прогноз на 2002 год по Укрзалізниці среднесуточного грузооборота составляет – 482,32 млн т·км, отклонение от фактического значения [7] составляет 8,85 %.

Таблица 3

Вариант	A	B	C	D	Максимальная погрешность, %
1	1,0682	48,3577	–49,224	43,0469	47,2
2	1,2533	0,0467	–15,940	113,1754	14,0

Проведенный эконометрический анализ деятельности дорог Украины и Укрзалізниці показал, что предложенная динамическая модель в виде разностных уравнений (1) позволяет с погрешностью около 10 % прогнозировать грузооборот на последующий год. Для получения более точной модели, прогнозирующей с меньшей погрешностью, необходимо рассматривать более подробную информацию, т. е. статистические данные по месяцам (как рассмотрено на примере Приднепровской железной дороге).

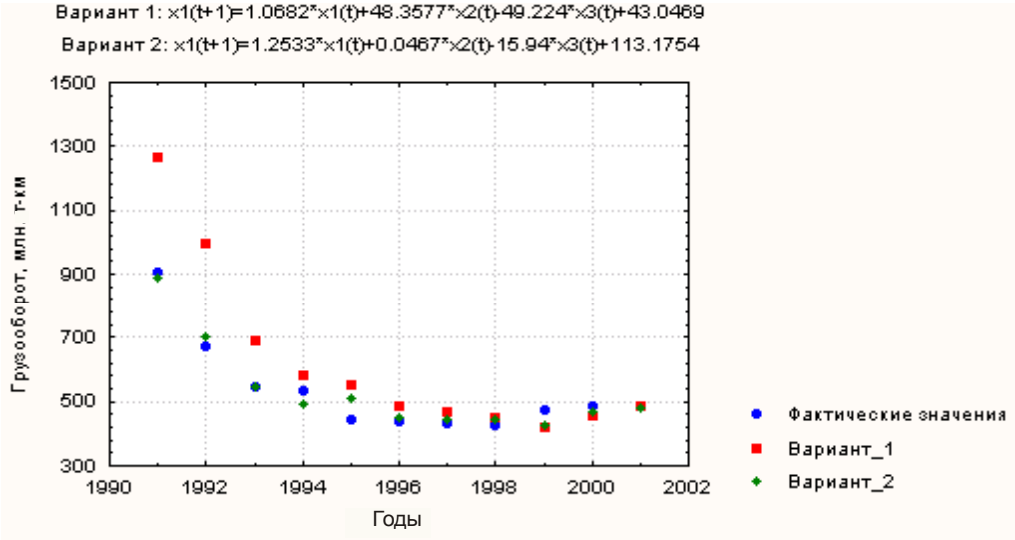


Рис. 3. Изменение грузооборота по годам на примере Укрзалізниці

Следует уделить большее внимание выбору факторов для построения математических моделей, т. е. научиться определять наборы предикторных переменных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правдин Н. В., Негрей В. Я. Прогнозирование пассажирских потоков. (методика, расчеты, примеры). – М.: Транспорт, 1980. – 222 с.
2. Пасечкін В. І. Аналіз динаміки показників залізниць України (за результатами моніторингу за період 1991–2001 рр.) // Залізничний транспорт України, 2002. № 5. – С. 2–6.
3. Наконечний С. І., Терещенко Т. О., Романюк Т. П. Економетрія. К.: КНЕУ, 2000. – 296 с.
4. Н. Дрейпер, Г. Смит Прикладной регрессионный анализ. Т. 1, – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
5. Н. Дрейпер, Г. Смит Прикладной регрессионный анализ. Т. 2, – М.: Финансы и статистика, 1987. – 351 с.
6. Статистичні дані Придніпровської залізниці з січня 2001 року по листопад 2002 року.
7. Железнодорожный транспорт – ведущая отрасль экономики Украины: (Информ.-стат. и аналит. материалы) / Под ред. Т. Мукминовой. – К.: Транспорт України, 2003. – 32 с.

Поступила в редколлегию 02.12.03.

УДК 511.342.2

А. А. БОСОВ, Н. А. МУХИНА (ДИИТ)

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ В СТРУКТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Розглянуто задачу структурного моделювання за допомогою певним чином побудованого регресійного аналізу.

Рассмотрена задача структурного моделирования с помощью специальным образом организованного регрессионного анализа.

The problem of structural modelling with the help of specially organized regression analysis has been considered.

Проблема выбора лучших предикторов для заданного отклика остается актуальной при моделировании сложных систем. Прежде всего это связано с большим числом взаимосвязанных элементов, при этом взаимосвязи, как правило, заранее неизвестны. Если исследователь не имеет предварительной информации о порядке предикторов по их важности для предсказания отклика, то решение проблемы, как правило, сводится к регрессии отклика по всем возможным подмножествам показателей и выбору среди них наилучшего набора предикторов. Если при этом число показателей велико, то задача становится практически неразрешимой. Так, если необходимо y раскрыть как функцию от M переменных, то для выбора лучшей необходимо построить $2^M - 1$ моделей. Например, если число показателей равно $M = 20$, возникает необходимость построения $2^M - 1 = 1048575$ моделей, что становится труднообозримым при анализе. Одним из путей преодоления этих трудностей является пошаговая регрессия [1; 2]. В этом случае проблема состоит в том, какие именно показатели и в какой последовательности необходимо включать в структуру математической модели.

В работе [3] подробно рассматривается метод структурного моделирования, основанный на применении отношения толерантности τ. Этот метод обладает определенными преимуществами, так как при заданной доверительной вероятности позволяет определить структуру математической модели, не решая задачи параметрической идентификации.

Несмотря на отмеченные преимущества данного подхода, он существенно зависит от объема опытных данных, что требует применения и других методов для окончательного выбора предикторных переменных.

Исходная информация и ее преобразование

Пусть исследуемый объект определяется системой показателей $\Omega = \{x_1,\ x_2, ..., x_N\}$, информация о которых задана в виде матрицы экспериментальных значений.

Обозначим через y один из элементов множества Ω, а именно тот, для которого необходимо определить лучшие предикторы, и в дальнейшем будем называть его откликом модели. В этом случае матрицу экспериментальных значений можно представить в виде

$$[YX] = \begin{bmatrix} y_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{M1} \\ y_2 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{M2} \\ \dots & & \dots & \dots & \dots \\ y_N & x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{MN} \end{bmatrix},$$

где N – число периодов наблюдений или число однотипных объектов наблюдений.

Относительно числа наблюдений предположим, что $N > M$.

Для удобства столбцы матрицы $[YX]$ обозначим через $X_1, X_2, \dots, X_M$, причем в дальнейшем будем считать, что X_i, $i = 1,\ M$ – ортонормированные векторы, принадлежащие евклидовому пространству размерности N.

Необходимо отметить, что, как правило, это требование на практике не выполняется, поэтому матрицу экспериментальных значений $[YX]$ необходимо преобразовать в матрицу Z, столбцы которой являются ортонормированными векторами.

Для замкнутости изложения кратко опишем процедуру ортогонализации системы векторов.

Положим

$$Z_1 = X_1 / |X_1|,$$

где $|X_1| = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} x_{1i}^2}$ – длина вектора X_1.

Ортонормируем второй столбец, положив

$$Z_2 = \alpha_{22} \cdot X_2 - \alpha_{21} \cdot Z_1.$$

Коэффициенты α_{22}, α_{21} определим из условий:

$$\langle Z_2, Z_1 \rangle = 0;$$

$$\langle Z_2, Z_2 \rangle = 1,$$

где $\langle Z_2, Z_1 \rangle$ – скалярное произведение векторов Z_2 и Z_1, которое будем вычислять по формуле

$$\langle Z_2, Z_1 \rangle = \sum_{i=1}^{N} Z_{2i} \cdot Z_{1i}.$$

Таким образом, в результате решения системы

$$\begin{cases} \alpha_{22} \langle X_2, Z_1 \rangle \alpha_{21} = 0, \\ \alpha_{22}^2 \langle X_2, X_2 \rangle - 2\alpha_{22}\alpha_{21} \langle X_2, Z_1 \rangle + \alpha_{21}^2 = 1 \end{cases}$$

имеем:

$$\alpha_{21} = \frac{\langle X_2, Z_1 \rangle}{\sqrt{\langle X_2, X_2 \rangle - \langle X_2, Z_1 \rangle^2}},$$

$$\alpha_{22} = \frac{1}{\sqrt{\langle X_2, X_2 \rangle - \langle X_2, Z_1 \rangle^2}}.$$

Для определения Z_3 получим соотношение вида

$$Z_3 = \alpha_{33} X_3 - \alpha_{31} Z_1 - \alpha_{32} Z_2,$$

где коэффициенты α_{33}, α_{31}, α_{32} определим таким образом, чтобы вектор Z_3 имел единичную длину и при этом был бы ортогонален векторам Z_1 и Z_2 т. е.

$$\langle Z_3, Z_3 \rangle = 1;$$

$$\langle Z_3, Z_1 \rangle = 0;$$

$$\langle Z_3, Z_2 \rangle = 0.$$

Из ортогональности следует

$$\begin{cases} \alpha_{31} = \alpha_{33} \langle X_3, Z_1 \rangle; \\ \alpha_{32} = \alpha_{33} \langle X_3, Z_2 \rangle. \end{cases}$$

Требование, чтобы вектор Z_3 имел единичную длину, приводит к необходимости решения уравнения

$$\alpha_{33}^2 \langle X_3, X_3 \rangle + \alpha_{31}^2 + \alpha_{32}^2 - 2\alpha_{33}\alpha_{31} \langle X_3, Z_2 \rangle - \\ -2\alpha_{33}\alpha_{32} \langle X_3, Z_2 \rangle = 1,$$

подставив в которое рассчитанные α_{31} и α_{32}, приходим к уравнению

$$\alpha_{33}^2 (\langle X_3, X_3 \rangle - \langle X_3, Z_1 \rangle - \langle X_3, Z_2 \rangle) = 1,$$

откуда следует, что

$$\alpha_{33} = \frac{1}{\sqrt{\langle X_3, X_3 \rangle - \langle X_3, Z_1 \rangle - \langle X_3, Z_2 \rangle}}.$$

В общем виде процесс ортогонализации описывается следующими рекуррентными соотношениями:

$$Z_k = \alpha_{kk} \cdot X_k - \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_{ki} \cdot Z_i,$$

где

$$\alpha_{кк} = \frac{1}{\sqrt{\langle X_k, X_k \rangle - \sum_{i=1}^{k-1} \langle X_k, Z_i \rangle}},$$

$$\alpha_{ki} = \alpha_{kk} \langle X_k, Z_i \rangle,$$

$$i = \overline{1, k-1}.$$

Модель с минимальной погрешностью

Математическую модель будем строить в классе линейных моделей в следующем виде:

$$y = a_0 z_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + \ldots + a_м z_м. \qquad (1)$$

где z_0 – фиктивная переменная, равная единице во всех опытах, коэффициенты a_i, $i = \overline{0, M}$ определим по методу наименьших квадратов (МНК).

Погрешность модели (1) представляет собой:

$$\varepsilon_0 = \max_{1 \le k \le N} \left(\left| y_k - \sum_{i=0}^{M} a_i z_{ik} \right| \right). \qquad (2)$$

Пусть $V \subseteq \Omega$ – перечень показателей, которые мы не будем включать в математическую модель типа (1) в качестве предикторов, и пусть $|V|$ – число элементов в этом перечне, тогда от-

клик y будет определяться с помощью показателей из множества Ω/V в следующем виде:

$$y = \sum_{x_i \in \Omega/V} a_i z_i \ .$$

Очевидно, что погрешность модели существенно будет зависеть от множества V и ее можно представить в виде

$$\varepsilon(\Omega/V) = \max_{1 \le k \le N} \left(\left| y_k - \sum_{\Omega/V} a_i z_{ik} \right| \right)$$

или

$$\varepsilon(\Omega/V) = \max_{1 \le k \le N} \left(\left| y_k - \sum_{i=0}^{M} a_i z_{ik} + \sum_{i \in V} a_i z_{ik} \right| \right).$$

Таким образом, оценка имеет вид

$$\varepsilon(\Omega/V) \le \varepsilon_0 + \max_{1 \le k \le N} \left(\left| \sum_{i \in V} a_i z_{ik} \right| \right)$$

или, обозначив через

$$\delta(V) = \max_{1 \le k \le N} \left(\left| \sum_{i \in V} a_i z_{ik} \right| \right),$$

можно утверждать, что

$$\varepsilon(\Omega/V) \le \varepsilon_0 + \delta(V).$$

Таким образом, возникает задача для заданного отклика y определить такой набор предикторов, чтобы погрешность $\delta(V)$ была бы как можно меньше, при этом число исключаемых из набора показателей $|V|$ было бы как можно больше.

В математическом плане сформулированная задача представляет собой задачу векторной оптимизации, и может быть представлена в виде

$$\begin{gathered} \delta(V) \to \min, \\ |V| \to \max, \\ V \subseteq \Omega . \end{gathered} \qquad (3)$$

Сформулируем основные свойства решения задачи (3).

Исходя из определения функции $\delta(V)$, следует

$$\delta(V_1 \cup V_2) \le \delta(V_1) + \delta(V_2),$$

т. е. она является полуаддитивной функцией множества.

Построим функцию

$$\overline{\delta}(V) = \sum_{i \in V} \delta(\{z_i\}),$$

для которой выполняется

$$\delta(V) \le \overline{\delta}(V).$$

Рассмотрим задачу векторной оптимизации для аддитивной вектор-функции множества V:

$$\begin{pmatrix} \overline{\delta}(V) \\ |V| \end{pmatrix} \to \min . \qquad (4)$$

Определим, что будем понимать под решением задачи (4) и сформулируем его основные свойства.

1. Множество элементов $V_* \subseteq \Omega$ будем называть эффективным, если любая его вариация приводит к увеличению или $\overline{\delta}(V)$, или $|V|$, или $\overline{\delta}(V)$ и $|V|$ одновременно.

2. Под решением задачи (3) будем понимать множество A, содержащее все эффективные наборы типа V_*, т. е. элементами множества A являются подмножества множества Ω, причем каждый из элементов представляет собой эффективное решение задачи (4).

Множество A называется множеством несравнимых вариантов по Парето. В рассматриваемой задаче это множество состоит из M элементов, представляющих собой структуры моделей, которые могут быть выбраны, исходя из заданной точности и числа предикторных переменных.

Пример. Рассмотрим задачу структурного моделирования для Приднепровской железной дороги, где в качестве исходной информации о деятельности дороги рассматриваются данные, приведенные в работе [5]. Деятельность предприятия будем определять по следующим показателям:

x_1 – грузооборот (млн т·км);

x_2 – пассажирооборот (млн пас-км);

x_3 – количество погруженных вагонов (тыс.);

x_4 – количество разгруженных вагонов (тыс.);

x_5 – производительность локомотивов (тыс. т·км брутто);

x_6 – вагонооборот (сутки).

В качестве отклика y рассмотрим x_1 – грузооборот. В соответствии с изложенной процедурой вычислим погрешности моделей $\overline{\delta}(\{x_i\})$, где $i = 2,6$.

Результаты сведем в табл. 1.

Таблица 1

x_i	$\bar{\delta}(\{x_i\})$	$\bar{\delta}$ %
x_2	4,698	2,4989
x_3	5,030	2,6755
x_4	8,820	9,4231
x_5	10,740	9,6931
x_6	5,010	2,6649

Заметим, что если включить в математическую модель в качестве предикторов все переменные, получим

$$x_1 = -63,459 - 0,346x_2 - 6,249x_3 + \\ +27,083x_4 + 0,113x_5 - 3,512x_6 .$$

Максимальная погрешность данной модели при этом составила $\varepsilon_0 = 2,2872\,\%$, отметим, что она оказалась меньше всех погрешностей $\bar{\delta}$ % из табл. 1.

Результаты решения задачи (4) представим в виде табл. 2.

Таблица 2

№ п. п	Ω/V	V	$\delta(V)$ %
1	$\{x_3, x_4, x_5, x_6\}$	$\{x_2\}$	2,4989
2	$\{x_3, x_4, x_5\}$	$\{x_2, x_6\}$	5,1638
3	$\{x_4, x_5\}$	$\{x_2, x_3, x_6\}$	7,8393
4	$\{x_5\}$	$\{x_2, x_3, x_4, x_6\}$	17,2624
5	$\{\ \}$	$\{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$	26,9555

Таким образом, если допустимая максимальная погрешность должна быть не больше 10 %, то структура математической модели с минимальным числом предикторов будет иметь вид

$$x_1 = f(x_4, x_5),$$

в этом случае математическую модель можно представить в следующем виде

$$x_1 = a_0 + a_4 x_4 + a_5 x_5 , \qquad (5)$$

где параметры модели a_i – определяются по методу наименьших квадратов и равны:

$$a_0 = -73,570;$$

$$a_4 = 21,213;$$

$$a_5 = 0,097,$$

при этом максимальная погрешность составляет 2,2 %.

Таким образом, грузооборот (x_1) определяется количеством разгруженных вагонов (x_4) (тыс. сут.), и производительностью локомотива (x_5) (тыс. т·км брутто/сут.).

На рис. 1 представлены наблюдаемые и рассчитанные по модели (5) значения грузооборота (x_1).

Для сравнения приведем математическую модель (6), когда в качестве предикторов взяты все показатели x_2, x_3, x_4, x_5, x_6.

$$x_1 = -63,459 - 0,346x_2 - 6,250x_3 + \\ +27,083x_4 + 0,113x_5 - 3,512x_6 . \qquad (6)$$

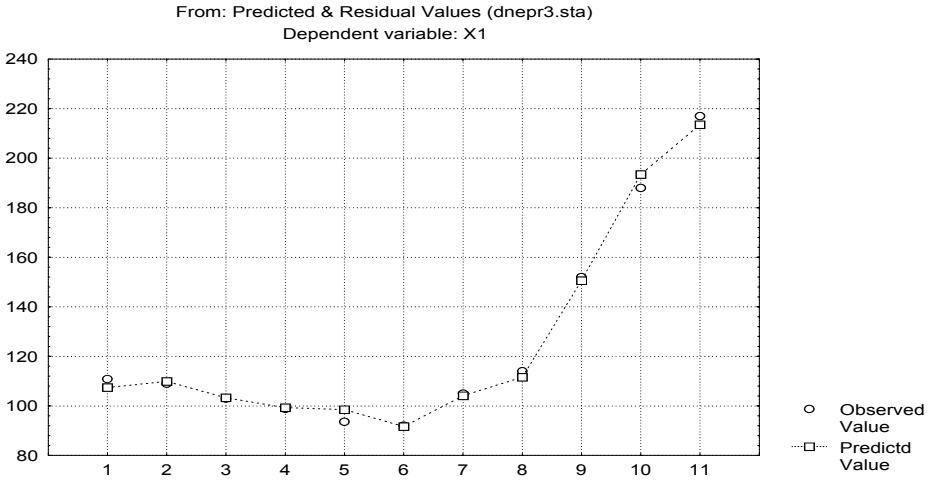


Рис. 1. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных по модели (5) значений грузооборота

На рис. 2 представлены наблюдаемые и рассчитанные по модели (6) значения грузооборота в зависимости от пассажирооборота, количества погруженных и разгруженных вагонов, производительности локомотива и вагонооборота.

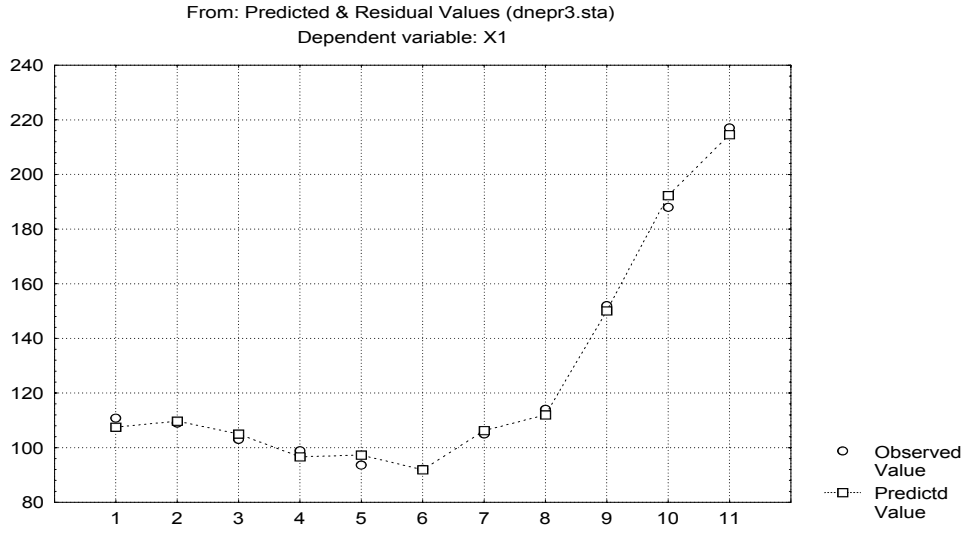


Рис. 2

Выводы

1. Предложена методика выбора предикторных переменных с определенным порядком применения регрессионного анализа.

2. Получена возможность выбора предикторных переменных по заданной точности математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
2. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 2. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 352 с.
3. Босов А. А., Мухина Н. А. Основные задачи моделирования по экспериментальным данным // Питання прикладної математики та математичного моделювання: Зб. наук. праць ДДУ. – Д., 1999. – С. 7–12.
4. Боровиков В. П., Боровиков И. П. STATISTICA, Статистический анализ и обработка данных в среде WINDOWS. – М.: Филин.
5. Пасечкін В. І. Аналіз динаміки показників залізниць України (за результатами моніторингу за період 1991–2001 рр.). // Залізничний транспорт України № 5, 2002. – С. 2–6.

Поступила в редколлегию 22.10.03.

УДК: 629.4:016.12

Г. В. ЕВДОМАХА, Ю. Н. ИВЧЕНКО, В. В. СКАЛОЗУБ, К. Г. ЖЕЛЕЗНОВ,
В. А. ЛИТВИН, А. П. ИВАНОВ (ДИИТ)

РЕЖИМЫ ВЕДЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ И ПЕРЕМЕННЫХ ТАРИФОВ ОПЛАТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Запропоновано моделі та методи розрахунку оптимальних режимів ведення електропоїздів, які враховують випадковий характер напруги в тяговій мережі та умови залежності ціни електричної енергії від періоду доби. Подано критерії ефективного використання змінних тарифів і приклади розрахунків оптимальних режимів ведення приміських електропоїздів.

Предложены модели и методы расчета оптимальных режимов ведения электропоездов, которые учитывают случайный характер напряжений в тяговой сети и условия зависимости цены электрической энергии от периода суток. Предложены критерии по эффективному использованию переменных тарифов и приведены примеры расчетов оптимальных режимов ведения пригородных электропоездов.

The authors propose models and calculation methods for optimal modes of running emu trains, taking into account the random character of catenary voltages and the conditions of dependence of electric power price upon the time of day. The paper suggests criteria for efficient use of variable tariffs and provides examples of calculating the optimal modes of running suburban emu trains.

Задача выбора оптимальных режимов ведения поездов

Задача выбора оптимальных режимов ведения поездов (ЗРВП) является одной из основных для железнодорожного транспорта. Содержание, структура, присутствие факторов случайности и неопределенности параметров в ЗРВП позволяют классифицировать ее как задачу стохастического оптимального управления [1; 2]. Во многих исследованиях она рассматривается в детерминированной постановке [3; 4], или же случайные характеристики (напряжения на токоприемнике, масса поезда, параметры поездопотока и др.) заменяются значениями, которые соответствуют математическим ожиданиям. В работе [5] было указано, что в силу невыпуклости вверх функций, определяющих модель ЗРВП (в частности, тяговых и токовых характеристик электроподвижного состава (ЭПС) [6], а также способа вхождения этих характеристик в модели задачи) и невыполнения неравенств Иенсена [2] переход к детерминированному аналогу исходной задачи требует строгого обоснования, поскольку здесь возможны случаи несоответствия решений, полученных для стохастической и детерминированной формулировок задачи ЗРВП.

В настоящей работе вопрос о корректности учета стохастических компонентов задачи ЗРВП рассмотрен более подробно. Выполненные расчеты по построению режимных карт движения пассажирских электропоездов с учетом случайного характера напряжений на токоприемнике ЭПС подтвердили положения работы [5]. Причем в некоторых расчетах была установлена неустойчивость оптимальных решений – изменение характера закона управления (значений токов на различных позициях контроллера) при вариации напряжений на токоприемнике. В связи с этим сделаны расчеты режимных карт движения, основанные на двухэтапной модели задачи [2; 5], предполагающей выбор такого оптимального управления, для которого ожидаемый расход электроэнергии (или же ее стоимость) на движение поезда с учетом неизбежной корректировки будет наименьшим.

В настоящее время энергосистемами с целью стимулирования выравнивания нагрузок в пиковые и другие периоды суток предлагаются дифференцированные тарифы оплаты (ДТО) электроэнергии, согласно которым ее цена изменяется более, чем в 7 раз. В представленной работе рассматривается ЗРВП, в которой в условиях применения дифференцированных тарифов в качестве критерия используется минимум стоимости электроэнергии, потребленной на тягу поездов. Построенные для этих случаев режимы движения электропоездов сравниваются с режимами, оптимальными по расходу электрической

энергии. Таким образом, применение ДТО приводит к необходимости рассмотрения спектра режимов, обусловленных зависимостью оптимальных управлений от периода суток t.

Будем считать, что система дифференциальных уравнений вида (1) и начальные условия (2) [5], которые описывают движение поезда как гибкой нити длины L_n с погонной массой $p_n(z)$, $0 \le z \le L_n$, приведены за счет конечноразностной аппроксимации по параметру x: $X = \{x_k = kh_x$, $k = 0,1,2,\ldots,n_x\}$, к виду нелинейной модели стохастического программирования (ЗНСП):

$$v_{k+1}^2 = v_k^2 + h_x \frac{2\zeta}{(q+Q)(1+\gamma)}\Big[F_e\left(x_{(k)e}\right) - W\left(x_{(k)w}\right) - B_T\left(x_{(k)B}\right)\Big]; \quad (1a)$$

$$\tau_{k+1} = \tau_k + h_x \frac{\tau_*\left(I_D\left(v\left(u\left(x_k,t\right),U_C\left(x_k,t,\theta\right)\right)\right) - \tau\left(x_k,t\right)\right)}{v\left(x_k,t\right)T_D\left(I_D\left(v\left(u\left(x_k,t\right),U_C\left(x_k,t,\theta\right)\right)\right)\right)}; \quad (1б)$$

$$x(0) = x_0; \quad v(0) = v_0; \quad \tau(0) = \tau_0. \quad (2)$$

Здесь обозначено: x, t – координаты пути и времени; $u(x,t)$ – управление (номер позиции контроллера); v – скорость центра масс поезда; q, Q – массы локомотива и поезда; γ – коэффициент инерции вращающихся масс; $\zeta = g/1000$, g – ускорение силы тяжести; F_e – сила тяги локомотива; $W(*)$ – сопротивление поступательному движению поезда; B_T – действующая на поезд тормозная сила; τ – температура перегрева тяговых электродвигателей, $\tau_* = \tau\infty$; T_D, I_D – тепловые характеристики и ток тягового электродвигателя [6]; $U_C(*)$ – напряжение контактной сети; θ – совокупность случайных и неопределенных факторов задачи; $x_e = (v,u,U_C)$; $x_w = (x,v,u)$; $x_B = \left(v,k'(t),u,U_C\right)$, $k'(t)$ суммарная сила нажатия тормозных колодок. Остальные компоненты приведенной выше модели также записываются в соответствующем дискретизированном представлении.

Представим задачу ЗРВП с уравнениями движения (1)–(2) в следующем виде:

$$F(x,v,u,t) = M\left[A(u,\theta)\cdot C(t)\right] \Rightarrow \min, \quad (3)$$

где

$$A(*) = \sum \int_{X_0}^{X_S} \frac{\left(U_C(x,t) + I_a(x,v,u,t)\rho(x)\right)I_a(*)dx}{v(x,u,t)},$$

$I_a(*)$ – активный ток электровоза; $\rho(x)$ – эквивалентное сопротивление тяговой сети; $C(t)$ – тарифы оплаты электроэнергии; $M[*]$ – знак математического ожидания. Ограничения задачи задают следующие множества: G_u – множество управлений (позиции контроллера); ограничение на область допустимых фазовых траекторий, которое задают отношения $G_{XVT} = \{x_0 \le x \le x_S$; $0 < v \le v^{\max}(x,t)$; $0 < \tau \le \tau_{\max}\}$; x_S – конечная координата рассматриваемого участка пути; ограничения на возможные управления $u(x,t)$ в соответствии с требованиями технической эксплуатации тяговых двигателей; область допустимых управлений равна $G_{IFK} = \{I_D(*) \le I_D^{\max}$; $F_e(x_e) \le \psi_k(v)q$; $K''(t,u)\varphi_k(v) \le \psi_k(v)q_o\}$; допустимый ток – $I_D^{\max}$; q_o – нагрузка на ось экипажа; $\psi_k(k)$ – коэффициент сцепления колеса с рельсом; K'' – сила нажатия тормозных колодок колесной пары; $\varphi_k(v)$ – коэффициент трения тормозной колодки о колесо;

$$T_X(u) = \int_{X_0}^{X_S} \frac{dx}{v(x,u,t)} \le T_* \quad (4)$$

ограничение по времени хода T_*.

Стохастическая природа и неопределенные факторы задачи учитываются вектором θ, который включает характеристики поездопотока на участке и значения напряжений $U_C(x,t,\theta)$ на токоприемнике ЭПС и др.; параметры поезда $(L_n$, $p_n(z))$ и связанные с его движением характеристики в (1)–(2) считаются детерминированными. Координата t (время суток) отражает зависимости параметров поездопотока и стоимости электроэнергии от времени при использовании дифференцированных тарифов оплаты. Выражение для расхода электроэнергии $A(*)$ (3) учитывает потери электроэнергии в контактной сети от тока, потребляемого ЭПС при ведении поезда, согласно (1)–(2) (член $I_a(*)\rho(x)$.

Анализ модели задачи выбора режимов ведения поезда с использованием неравенства Иенсена

Как указывалось, часто при решении ЗРВП напряжение $U_C(x,t,\theta)$ считается постоянным, равным математическому ожиданию [3]. Анализ функций уравнений движения (1) и характеристик ограничений (3)–(4) позволяет установить невыполнение неравенств Иенсена [2]

$$M\left[f(\eta)\right] \le f\left(M[\eta]\right), \qquad (5)$$

где η – действительная случайная величина, $f(\eta)$ – непрерывная выпуклая вверх функция действительного переменного. При этом возможны существенные различия между решениями приближенной и стохастической задачи выбора оптимального управления движением поезда.

Поскольку в рассматриваемой задаче может быть получено $U_C(*): \bar{U}_C(x,t) = M\left[U_C(x,t,\theta)\right]$ – математическое ожидание для напряжения на токоприемнике, то формально ЗНСП может быть представлена в следующем виде:

$$\min_{z \in G_Z}\left(\varphi_0\left(z, \bar{U}_C\right)\right),$$

$$G_Z = \left\{\varphi_i\left(z, \bar{U}_C\right) \le 0, i = 1,2,\ldots n_\varphi; z \in Z\right\}. \qquad (6)$$

Осредненная задача ЗНСП (5) дает точное решение стохастической, если все функции (6) линейны относительно набора θ, или же выполняются отношения:

$$\Psi_j(z) = M\left[\varphi_j\left(z, U_C(\theta)\right)\right] \le \varphi_j\left(z, \bar{U}_C\right),$$

$$j = 0,1,\ldots,n_\varphi. \qquad (7)$$

В случае (7) любое допустимое решение (6) будет решением и для ЗНСП [2], причем для оптимальных решений соблюдается отношение

$$\min \Psi_0(z) \le \min \varphi_0\left(z, \bar{U}_C\right). \qquad (8)$$

Соотношения (7)–(8) имеют место, если выполняются неравенства (5).

Правые части (1) не являются линейными непрерывными и выпуклыми вверх функциями действительного переменного относительно $\bar{U}_C(*)$, как и некоторые другие элементы дискретизованной модели задачи (3)–(4). Так в уравнениях (1*а*) невыпуклой является F_e – сила тяги, а в (1*б*) – функции $I_D(*)$ и $v(*)$, а также способ их вхождения в уравнения, приводящий к невыпуклости модели. Проведенный анализ модели ЗВРП показывает, что замена напряжения $U_C(*,\theta)$ значением математического ожидания может приводить к существенным различиям между решениями стохастической задачи оптимального управления и ее детерминированного эквивалента. Представленные ниже расчеты подтверждают это положение.

Двухэтапная модель для стохастической задачи выбора режимов ведения поездов

Остановимся на путях реализации ЗРВП с учетом стохастических факторов θ. Нестабильность напряжений в электротяговой сети (рис. 1), а также $U_C(x,t,\theta)$ – напряжений на токоприемнике ЭПС приводит к тому, что действительные режимы ведения поездов отличаются от рассчитанных для фиксированных $\bar{U}_C(*)$. В связи с этим возникает задача выбора оптимальных режимов для (1)–(4), устойчивых к присутствующей в задаче неопределенности. В приложении к ЗРВП будем считать, что «защищенность» оптимальных режимов ведения поездов означает необходимость минимальных дополнительных затрат электроэнергии на их коррекцию при движении. В этом случае ЗРВП может быть представлена как двухэтапная задача [2; 5] стохастического оптимального управления. Для постановки двухэтапной ЗРВП примем в качестве вектора, зависящего от неопределенных факторов, значения возможных диапазонов напряжений, отличных от принятого расчетного номинала $\bar{U}_C$:

$$\Delta U_C(\theta) = \Big(\big(P_1, \Delta U_1(\theta_1)\big), \big(P_2, \Delta U_2(\theta_2)\big), \ldots, \big(P_k, \Delta U_k(\theta_k)\big)\Big);$$

$$\sum_j P_j = 1. \qquad (9)$$

В векторе (9) введены следующие параметры: $\left\{P_j \ge 0\right\}_k$ – оценки вероятностей для заданных диапазонов значений напряжений $\left\{\Delta U_j\left(\theta_j\right)\right\}_k$. Обозначим дополнительный расход электроэнергии, обусловленный неточностью задания напряжений в уравнениях движения (1) и компенсируемый за счет тока

$I_{ak}(x,u,t,\theta)$, через $\Delta A(x,u,t,\theta)$. Тогда минимальные ожидаемые затраты на реализацию управления $u(x,t)$ и его коррекцию образуют критерий двухэтапной ЗРВП вида

$$A(u(x,t)) + M\left[\Delta A(u(x,t,\theta))\right] \Rightarrow \min_{u \in D_u}, \quad (10)$$

где

$$\Delta A(*) = \rho(x)\left|I_{ak}^2(u(x,t,\theta)) - I_a^2(u(x,t))\right|,$$

$A(*)$ – величина электропотребления из (3); $M[*]$ – знак математического ожидания. В двухэтапной задаче стохастического оптимального управления (1)–(4), (9)–(10) корректирующее множество совпадает с множеством управлений. В ней вектор параметров (9) представляет дополнительную информацию, необходимую для постановки двухэтапной ЗРВП. Значения (9) могут быть рассчитаны для каждого электрифицированного участка на основе применения интегрированных информационных технологий процесса перевозок [5]. Аналогичная постановка двухэтапной задачи может быть сделана с использованием критерия минимума стоимости электроэнергии, когда учитываются различные тарифы оплаты по периодам суток.

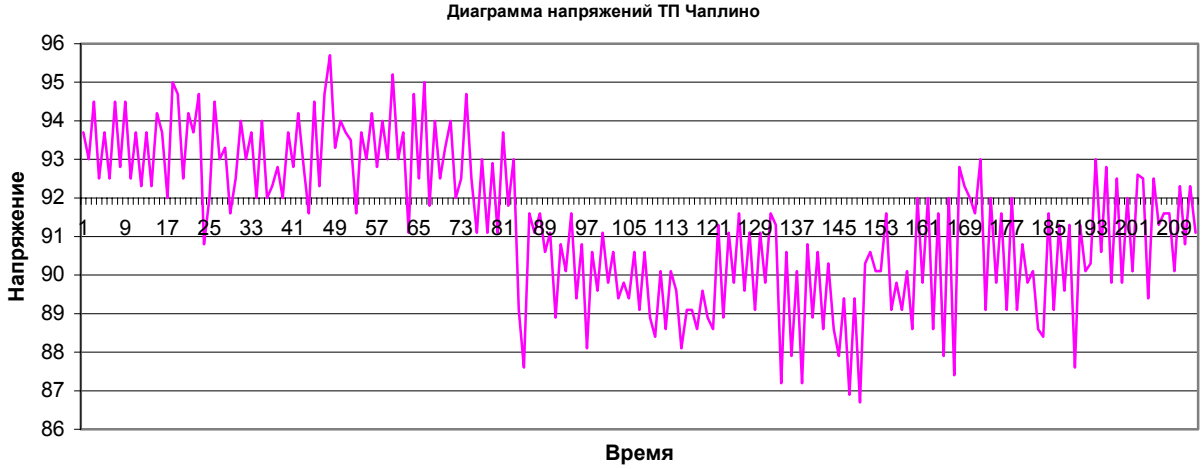


Рис. 1. График относительных величин напряжений по данным мониторинга счетчиками «Альфа»

Авторы выражают благодарность В. Г. Кузнецову за предоставленные данные по мониторингу напряжений в тяговой сети

Реализации задачи ЗРВП с учетом случайного напряжения на токоприемнике ЭПС и применения дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии

Для иллюстрации некоторых фактических условий реализации выбранных режимов ведения поездов на рис. 1 показан график относительных уровней напряжений в тяговой сети (в процентах от номинала), полученный в течение суток путем поминутного мониторинга величин напряжений для тяговой подстанции Чаплино.* График позволяет также установить присутствие некоторого «тренда» для уровня напряжений, связанного с неравномерностью электропотребления по периодам суток. Случайный характер значений напряжений в тяговой сети с колебаниями до 8–9 % представляется значимым. На рис. 2 представлены графики оптимальных по расходу электроэнергии режимов ведения пригородных поездов, рассчитанные для нормально распределенных случайных величин напряжений на токоприемнике: $M_U = 27$ кВ, $\sigma_U = 1{,}2$ кВ (верхний график), $M_U = 27$ кВ, $\sigma_U = 1{,}5$ кВ (нижний график). График показывает возможность качественного изменения характера оптимального управления (средняя часть пути) при вариациях напряжений в тяговой сети. При этом показатели электропотребления изменяются незначительно. На рис. 3 приведены решения ЗРВП в двухэтапной постановке (9)–(10) для параметров напряжений на токоприемнике $M_U = 25$ кВ, $\sigma_U = 1{,}2$ кВ. Верхний и средний графики соответствуют модели (1)–(4), а нижний – (9)–(10), в котором устранена неустойчивость закона управления. Причем вектор вероятностей отклонений (9) был равным:

$$\Delta U_C(\theta) = \big((0.05,(21-22)),(0{,}1,22-24),$$

$$(0{,}7,(24-26)),(0{,}1,(26-27)),(0{,}05,(27-28))\big),$$

где указаны диапазоны значений напряжений (в кВ) и их вероятности.



Рис. 2. Графики оптимальных скоростей движения электропоездов при случайной величине напряжений на токоприемнике ЭПС

В табл. 1 и на рис. 4 приведены некоторые результаты расчетов оптимальных режимов ведения пригородных электропоездов на участке Киев–Мироновка в условиях применения дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии. Рис. 4 позволяет установить отличия режимов ведения электропоезда (и участковых скоростей движения) с учетом дифференцированной стоимости энергии ночью и в полупиковый период от соответствующего ему случая, представленного на рис. 3 (средний график). При одинаковом времени движения по заданному участку и существенно большем уровне электропотребления (506 кВт·ч вместо 433 кВт·ч) стоимости электроэнергии будут относиться как 367 : 433 .

Таблица 1

Показатели потребления и стоимости электроэнергии при дифференцированных тарифах оплаты

Тарифные зоны	Полупиковая зона	Ночь
Расход энергии на движение (кВт·ч)	253,00	131,00
На собственные нужды и др. (кВт·ч)	63,00	59,00
Коэффициенты стоимости по зонам	1,02	0,25
Всего электроэнергии	316,00	190,00
Относительная стоимость (с учетом коэффициентов)	320,00	47,00

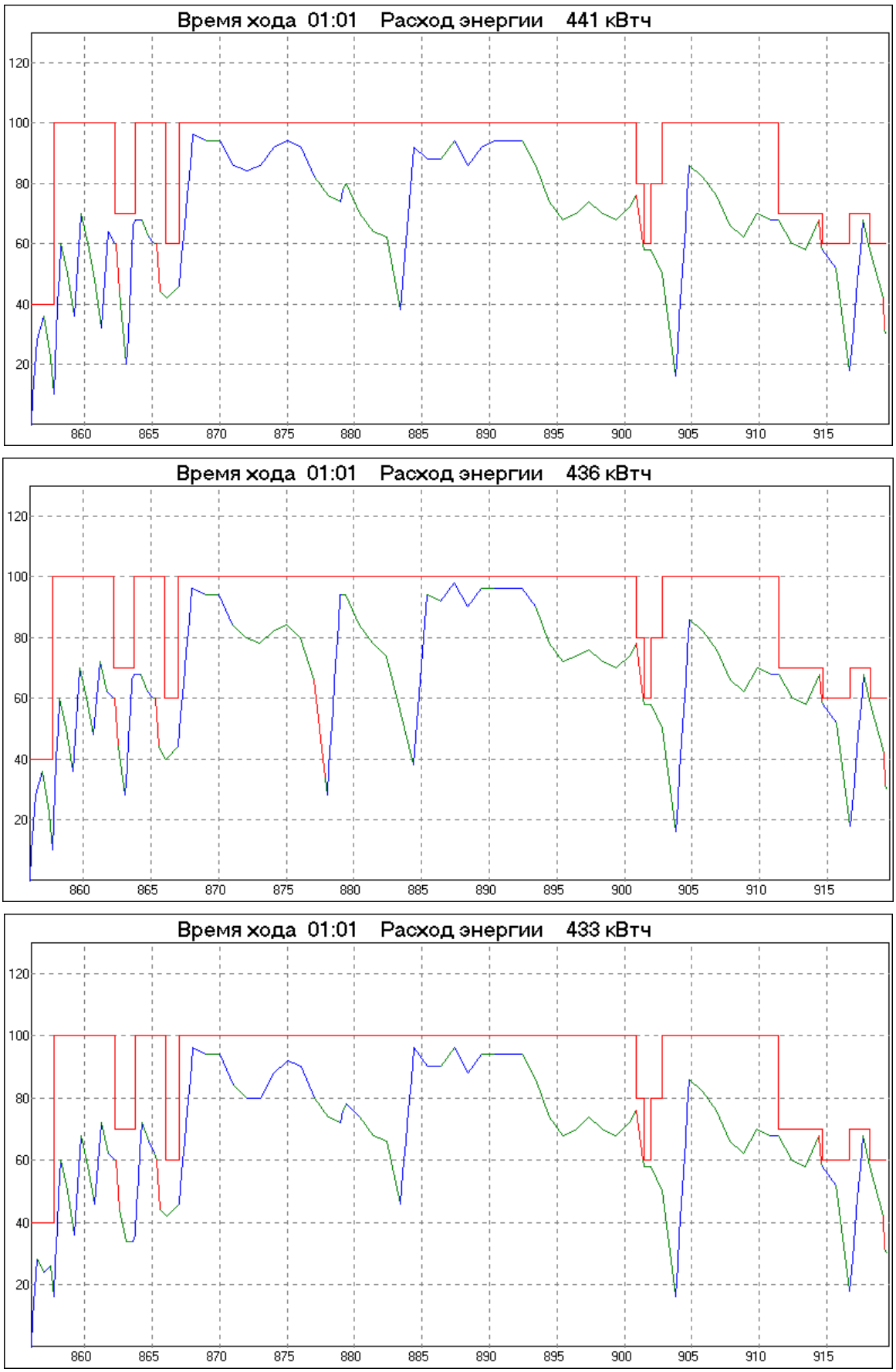


Рис. 3. Решение двухэтапной задачи расчета оптимальных режимов ведения поездов

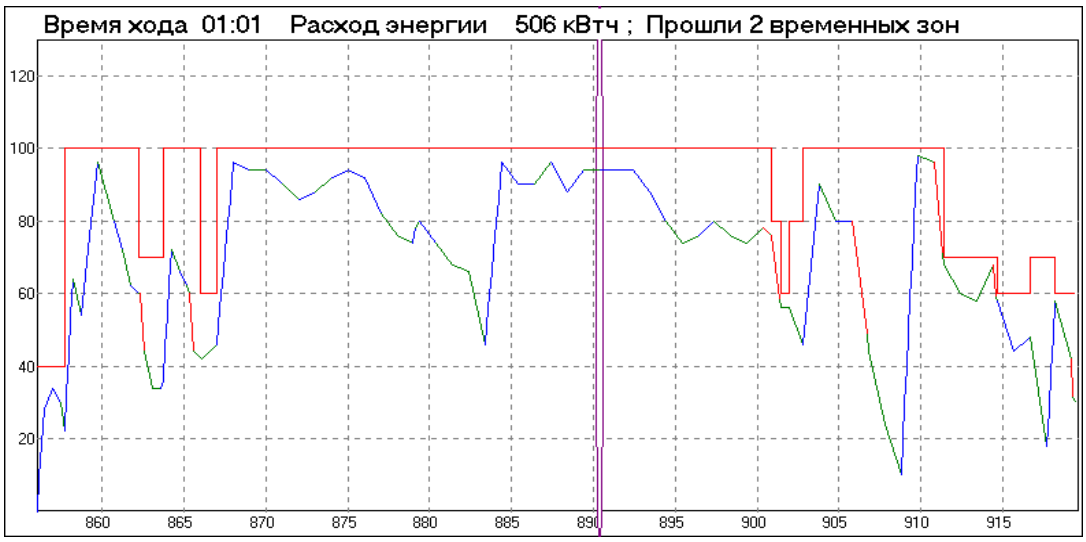


Рис. 4. График скорости движения электропоездов при использовании дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии

Приведенные на рис. 2–4 результаты, а также другие подобного рода расчеты, свидетельствуют об эффективности предложенных методов учета как условий применения дифференцированных тарифов электроэнергии, так и случайных характеристик напряжений на токоприемнике ЭПС. Оптимальные режимы ведения поездов рассчитывались на основе модификации программы метода динамического программирования, представленной в работе [3].

Методы анализа экономической эффективности применения дифференцированных тарифов

Как показано в [7], задачи по оценке эффективности применения дифференцированных тарифов должны решаться во взаимосвязи с задачами по расчету оптимальных режимов движения поезда. При этом из-за значительного количества тяговых подстанций (ТП) возникают вычислительные трудности, которые вызваны комбинаторным характером процесса расчета оптимального распределения ТП соответственно условиям использования разных тарифов. Для упрощения методики экономического анализа с учетом практических потребностей и возможностей необходимо вместо поиска варианта распределения ТП по разным тарифам рассматривать более простую задачу – расчет эффективности применения ДТ для одной заданной ТП или для зафиксированного множества $J_A = \{j_1, j_2, \ldots, j_m\}$ ТП.

Для заданного $\left(J_A = \{j_1, j_2, \ldots, j_m\}\right)$ множества ТП возможно лишь сравнение стоимостей потребленной электроэнергии для ДТ и единого тарифа

$$C_S = \sum c_i * W_i^s \le c_0 * W_S = C_0 . \qquad (11)$$

В критерии (11) обозначено: – $W_j^* = \left[W_{i,j}^*\right]_p$ $\forall j \in J_A$, – матрицы потребления электроэнергии по $W_i^s = \sum_{j \in J_A} W_{i,j}$ периодам суток $i = 1, 2, 3$; $W_S = \sum_i W_i$; $p = 3$; c_0 – единый тариф; c_i – дифференцированные тарифы; C_0 – стоимость электроэнергии для единого тарифа.

В случае выполнения условия (11) для некоторой тяговой подстанции или множества ТП, применение сменных тарифов для них экономически целесообразно.

Обобщение правила (11) ($C_S < C_0$) состоит в использовании характеристики $\hat{m}_C(\bar{c})$ – математического ожидания цены электроэнергии [7]. Смысл этого условия в том, что для определения экономической целесообразности важно знать не объемы потребления электроэнергии ТП по периодам суток, а лишь соотношения между этими показателями для разных периодов суток. Таким образом, для определения эффективности применения ДТ достаточно проверить следующий критерий:

$$\hat{m}_C(\bar{c}) = \sum \alpha_i \cdot c_i < c_0 , \quad \alpha_i = W_i^S / W_S . \quad (12)$$

При выполнении условия (12) переход на ДТ является экономически эффективным.

Условие (12) позволяет установить предельные удельные (или абсолютные) объемы по-

требления электроэнергии для установленных коэффициентов для разных периодов суток, при которых применения ДТ остается эффективным по показателям стоимости. Так для коэффициента тарифной зоны (j) предельный показатель объема потребления рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_j^* = \left(c_0 - \sum_{i \neq j} \alpha_i \cdot c_i \right) \Big/ c_j \, . \qquad (13)$$

На основе дополнительной информации, необходимой для постановки двухэтапной задачи стохастического программирования [2], можно получить более точное условие эффективности применения ДТ при закупках электроэнергии

$$M_{(c,\alpha)}[\tilde{c},\tilde{\alpha}] = \sum_i \left\{ (\hat{\alpha}_i \cdot \hat{c}_i) + M[\Delta\alpha_{ik} p_{ik}] \cdot \hat{c}_i \right\} < c_0 , \quad (14)$$

где второй, дополнительный, член обобщает критерий (12) для условий ДТ. В (14) обозначено: $\tilde{\alpha}$, $\hat{\alpha}_i$ случайная $\Delta\alpha_{ik}$ – величина удельного потребления электроэнергии, среднее и отклонение от средних в i-м периоде суток, p_{ik} – вероятность k – го интервала отклонений; $\tilde{c}$, $\hat{c}_q$, – случайная величина цены и ее среднее значение на протяжении i-го часа суток; $M[*]$ – знак математического ожидания значений случайных величин. Информация для (14), может быть получена с помощью системы АСКУЭ.

Для применения критерия (14) необходимо построить закон распределения отклонений случайных величин удельного потребления электроэнергии в каждом i-м периоде таблицы тарифов следующего вида:

$$\frac{\Delta\alpha_k}{p_k} \left| \frac{\Delta\alpha_{k1}}{p_{k1}} \right| \left| \frac{\Delta\alpha_{k2}}{p_{k2}} \right| \left| \frac{\Delta\alpha_{k3}}{p_{k3}} \right| \ldots \left| \frac{\Delta\alpha_{ki}}{p_{ki}} \right| \cdot \left| \frac{\Delta\alpha_{km}}{p_{km}} \right| . \qquad (15)$$

Законы распределения вида (15), содержащие отклонения от средних и соответствующие значения вероятностей, необходимо построить для всех тарифных зон каждого ДТ, которые рассматривается при анализе эффективности методов закупки электроэнергии.

Модели и методы оценки экономической эффективности работы железной дороги на рынке электрической энергии

С некоторыми изменениями условие (12) может использоваться для оценки эффективности закупки электроэнергии в оптовом рынке электроэнергии Украины (ОРЭ). При этом критерий принимает следующий вид:

$$\sum_i \alpha_i'' \cdot c_i < c_0^{\delta} \, , \quad \alpha_i'' = W_i^S \big/ W_{iS}'' \, , \qquad (16)$$

где характеристики представляют следующее: c_i – прогнозируемые оценки цены электроэнергии в ОРЭ на протяжении i-го часа суток, W_i^S – прогнозируемый показатель потребления электроэнергии для i-го часа суток, W_{iS}'' – приведенный показатель потребления электроэнергии вида

$$W_{iS}'' = \sum_k W_{ik} \cdot \left(\frac{c_0^k}{c_0^{\delta}} \right),$$

где W_{ik} – объем потребления электроэнергии k-го облэнерго для i-го часа суток; α_i'' – корректированные показатели относительного потребления электроэнергии (когда 100 % объема принимается за единицу) на тягу за тот же период; c_0^{δ} – единый, принятый за базовый, тариф платы за электроэнергию; c_0^k – единый тариф платы за электроэнергию для k-го Облэнерго.

Приведенные характеристики критерия (14) обобщают условие (15). Это вытекает из того, что при равенстве единого тарифа по всем облэнерго $\left\{ c_0^1 = c_0^2 = \ldots = c_0^k \right\}$ получаем характеристики условия (14).

Условие (16) не полностью учитывает стохастическую природу используемых характеристик (c_i, α_i). На основе дополнительной информации, необходимой для постановки двухэтапной задачи стохастического программирования [2; 7], может быть образован обобщенный критерий, предназначенный для оценки выгодности переменных тарифов при закупке электроэнергии, который имеет вид

$$M_{(c,\alpha)}[\tilde{c},\tilde{\alpha}] = \sum_i \left\{ (\hat{\alpha}_i \cdot \hat{c}_i) + M\left[\Delta\alpha_{ik}'' p_{ik}\right] \hat{c}_i + \right.$$

$$\left. + M\left[\Delta c_{iq} p_{iq}\right] \hat{\alpha}_i \right\} < c_0^{\delta} . \quad (17)$$

В (17) обозначено: $\tilde{\alpha}$, $\hat{\alpha}_i$, $\Delta\alpha_{ik}$ – случайная величина относительного потребления электроэнергии; p_{ik} – вероятность k-го интервала отклонения; $\tilde{c}$, $\hat{c}_q$, Δc_{iq} – случайная величина цены, среднее и отклонение от средних на про-

тяжении i-го часа суток, p_{iq} – вероятность q-го интервала отклонения; $M[*]$ – знак математического ожидания случайных значений цены, где второй и третий члены суммы применяются при условиях ОРЭ.

Для использования (17) необходимо построить закон распределения для отклонений случайных величин потребления электроэнергии в каждом i-м периоде для таблицы тарифов (15), а также закон распределения отклонений случайных величин цены электроэнергии вида

$$\frac{\Delta c_q}{p_q}\left|\frac{\Delta c_{q1}}{p_{q1}}\right|\left|\frac{\Delta c_{q2}}{p_{q2}}\right|\ldots\left|\frac{\Delta c_{qi}}{p_{qi}}\right|\cdot\left|\frac{\Delta c_{qm}}{p_{qm}}\right|. \qquad (18)$$

В (18) указаны отклонения от средних, а также соответствующие значения вероятностей. Законы распределения вида (18) необходимо построить для всех часовых зон, учтенных в ОРЭ.

Выводы

Выявлены существенные особенности режимов тяги, оптимальных по стоимости электроэнергии, и предложены новые модели и методы расчетов режимов ведения поездов, обеспечивающие снижение стоимости электроэнергии, потребленной на тягу поездов в условиях переменных тарифов, которые все шире применяются на железных дорогах Украины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блохин Е. П., Скалозуб В. В. Выбор режимов ведения поездов как стохастическая задача векторной оптимизации // Транспорт: Зб. наук. пр. / ДІІТ. – Д.: Наука і освіта. 2001, – Вип. 7. – С. 28–31.
2. Математические методы исследования операций / Ю. М. Ермольев, И. И. Ляшко, В. С. Михалевич, В. И. Тюптя – К.: Вища школа, 1979. – 312 с.
3. Блохин Е. П., Слободян А. В., Евдомаха Г. В. Методика расчета оптимальных по расходу электроэнергии времен хода поезда // Транспорт: Сб. научн. тр. / ДИИТ. – Д.: Наука и образование, 1999. – С. 47–55.
4. Гетьман Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда грузовых электровозов для железных дорог Украины // Дис. … д-р техн. наук. – Д., 2001. – 416 с.
5. Блохин Е. П., Пшинько А. Н., Евдомаха Г. В., Скалозуб В. В., Землянов В. Б. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов // Залізничний транспорт України, № 6, 2001. – С. 19–22.
6. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
7. Скалозуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии // Транспорт: Зб. наук. пр., – Д. 2002, – Вип. 12. – С. 158–167.

Поступила в редколлегию 02.12.03.

УДК 62–50

Н. І. ПОСЛАЙКО (ДІІТ)

ОБЧИСЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ОБСЛУГОВУЮЧИХ ПРИЛАДІВ У СИСТЕМАХ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, НЕОДНОРІДНИХ ЗА ЧАСОМ

У статті запропонована методика розрахунку оптимального числа обслуговуючих приладів у системі масового обслуговування типу $M|M|n$ з чергою, до якої надходить нестаціонарний, неординарний пуассонівський потік заявок і інтенсивність обслуговування заявок є функцією часу, на підставі використання чисельних методів.

В статье предложена методика расчета оптимального числа обслуживающих устройств в системе массового обслуживания типа $M|M|n$ с очередью, в которую поступает нестационарный, неординарный пуассоновский поток заявок и интенсивность обслуживания заявок является функцией времени, на основании использования численных методов.

The paper concerns a queuing-type mass service system, being disturbed by a non-stationary, non-ordinary Poisson flow of requests, when the intensity of serving is a function on time. On the basis of numerical methods, a technique of calculating the optimal number of serving devices has been offered.

Для більшості реальних систем масового обслуговування, в тому числі на транспорті, спостерігається залежність параметрів надходження й обслуговування заявок від часу. Наприклад, інтенсивності потоків пасажирів, вантажів, заявок на ремонтні роботи змінюються протягом доби залежно від сезону і т. ін. Такі системи практично неможливо розрахувати аналітичними методами. Дещо вдається зробити, якщо вхідний потік має інтенсивність, що періодично змінюється. Так, для системи масового обслуговування з відмовами доведено [1], що граничні ймовірності станів системи в цьому випадку є періодичними функціями часу, причому їх період співпадає з періодом вхідного потоку. Системи обслуговування з чергою, що однорідні за часом, у випадку відсутності післядії або «слабкої» післядії добре досліджені [2]. Методи теорії марковських процесів дають досить прості аналітичні умови існування стаціонарного режиму в таких системах. При порушенні цих умов зі зростанням часу довжина черги у вказаних системах наближається до нескінченності за ймовірністю. Використовуючи ці умови, можна вказати мінімальну кількість приладів, при якій стаціонарний режим у системі існує. Будемо називати цю кількість приладів оптимальною.

У цій роботі пропонується методика обчислення оптимального числа обслуговуючих приладів у системах масового обслуговування певного виду на підставі використання чисельних методів.

Розглядається система масового обслуговування, що складається з $m\left(1 \le m < \infty\right)$ приладів. До неї надходить неоднорідний за часом неординарний пуассонівський потік заявок. З цього випливає, якщо ν_t – число заявок, що надійшли в систему на $\left(0; t\right)$, то ν_t – процес з незалежними приростами. Припустимо, що при $\Delta \downarrow 0$

$$P\left\{\nu_{t+\Delta} - \nu_t = k\right\} = \lambda_k\left(t\right)\Delta + o\left(\Delta\right), \quad k \ge 1, \quad (1)$$

де функції $\lambda_k\left(t\right)$ вимірні (за Лебегом) і ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k\left(t\right) = \lambda\left(t\right) < \infty$$

збігається майже всюди на $\left(0; \infty\right)$; $\lambda_k\left(t\right)$ – інтенсивність надходження в систему групи з k заявок у момент часу t. З (1) випливає, що

$$M\theta^{\nu_t} = \sum_{k=0}^{\infty} P\left\{\nu_t = k\right\}\theta^k = \exp\left\{\int_0^t \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k\left(u\right)\left(\theta^k - 1\right)du\right\}$$

або в більш загальному випадку

$$\sum_{k=0}^{\infty} \theta^k P\left\{\nu_s - \nu_t = k\right\} = \exp\left\{\sum_{k=1}^{\infty}\left(\theta^k - 1\right)\int_t^{\rho} \lambda_k\left(u\right)du\right\}, \quad |\theta| \le 1. \quad (2)$$

Покладемо

$$r_k(t,s) = p\{\nu_s - \nu_t = k\}, \quad k \geq 0.$$

Згідно з (2)

$$r_0(t,s) = \exp\left\{-\int_t^s \lambda(u)\,du\right\},$$

$$r_m(t,s) = \frac{1}{2\pi i}\oint_{|\theta|=1} \frac{1}{\theta^{m+1}} \exp\left\{\sum_{k=1}^{\infty}\left(\theta^k - 1\right)\int_t^s \lambda_k(u)\,du\right\} d\theta$$

$$m > 0.$$

Якщо в момент надходження групи з r заявок l приладів вільні, то:

- кожна заявка займає вільний прилад і негайно починає обслуговуватись, якщо $l \geq r$;
- l заявок (без різниці які) займають кожна вільний прилад, а інші стають в чергу, якщо $l < r\ (r \geq 1, 0 \leq l \leq m)$.

Будемо вважати, що час обслуговування заявок на кожному приладі не залежить від часу обслуговування інших заявок і від характеру їх надходження, а також, що функція розподілу тривалості обслуговування повністю визначається моментом початку обслуговування. Тобто, якщо заявка почала обслуговуватись в момент t і $s > t$, то ймовірність того, що до моменту s обслуговування буде закінчено, дорівнює

$$1 - \exp\left\{-\int_t^s \mu(u)\,du\right\},$$

де $\mu(u) \geq 0$ вимірна функція на $(0;\infty)$. Це очевидно рівносильне тому, що, якщо заявка займає прилад у момент t і $\Delta \to 0$, то ймовірність того, що вона буде займати прилад у момент $t + \Delta$ (звільнить його до цього моменту) дорівнює

$$1 - \mu(t)\Delta + o(\Delta) \quad \left(\mu(t)\Delta + o(\Delta)\right),$$

де $\lim\limits_{\Delta\to 0} \dfrac{o(\Delta)}{\Delta} = 0$.

Величину черги і час дожидання кожною заявкою початку обслуговування будемо вважати необмеженими. Обслужені заявки негайно покидають систему. Описану систему обслуговування будемо називати системою $M_t|M_t|m$. В тому випадку, коли

$$\lambda_k(u) = \lambda_k \ \ (k \geq 1), \quad \mu(u) = \mu \quad (0 \leq u < \infty),$$

тобто, якщо «інфінітезимальні» характеристики системи не залежать від часу, ця система переходить (за термінологією Д. Кендалла [3]) в добре вивчену систему $M|M|m$. Оптимальна кількість приладів в такій системі визначається з умови

$$\sum_{k=1}^{\infty} k\lambda_k < n\mu.$$

Доведено, що за цієї умови функція розподілу періоду зайнятості системи (інтервалу часу, що починається в момент надходження у вільну систему заявок і закінчується в найближчий момент звільнення системи від заявок) є властивою – з ймовірністю 1 період зайнятості є скінченною величиною. У разі $\sum\limits_{k=1}^{\infty} k\lambda_k > n\mu$ функція розподілу є невластивою, тобто з додатною ймовірністю інтервал зайнятості може бути нескінченним. А коли $\sum\limits_{k=1}^{\infty} k\lambda_k = n\mu$, математичне сподівання періоду зайнятості є нескінченним.

Для системи $M_t|M_t|m$ розглянемо $\tau_{ij}(t)$ – час, за який процес ξ_t, що співпадає з числом заявок у системі в момент t, вперше досягне стану j:

$$\tau_{ij}(t) = \inf\{u : \xi_u = j, \xi_t = i\} \quad u \geq t$$

і нехай

$$D = \{0,1,2,\ldots,m-1\}.$$

Періодом зайнятості (з початком в стані κ) в системі обслуговування $M_t|M_t|m$ будемо називати величину $\tau_{k,m-1}(t)$, де $k \geq m$. Нехай $q_{kr}(t,s)$ – ймовірність того, що процес ξ_t на відрізку $[t;s]$ перейде зі стану k у стан r $(k, r \in D)$ без попадання в множину D:

$$q_{kr}(t,s) = P\{\xi_s = r, \xi_u \in D, u \in (t,s] / \xi_t = k\}.$$

Доведено [4], що

$$p\{\tau_{k,m-1}(t) \leq s - t\} = m\int_t^s q_{km}(t,\upsilon)\mu(\upsilon)\,d\upsilon, \quad (3)$$

де $q_{kr}(t,s)$ задовольняє інтегральне рівняння Вольтерра другого роду:

$$q_{km}(t,s)=\rho_{m-k}(t,s)-$$

$$-m\int_t^s q_{km}(t,\upsilon)\mu(\upsilon)\rho_1(\upsilon,s)d\upsilon. \quad (4)$$

Тут $\rho_k(t,s)$ – ймовірності станів цілочисельного процесу η_t з незалежними приростами, для якого

$$M\theta^{\eta_s-\eta_t}=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\rho_k(t,s)\theta^k=\exp\left\{\int_t^s a(u,\theta)du\right\},$$

звідки [5]

$$\rho_k(t,s)=\frac{1}{2\pi i}\oint_{|\theta|=1}\frac{1}{\theta^{k+1}}\exp\left\{\int_t^s a(u,\theta)du\right\}d\theta, \quad (5)$$

$$k=0,\pm1,\pm2,\ldots,$$

де

$$a(s,\theta)=\sum_{l=1}^{\infty}\lambda_l(s)\theta^l+\frac{m\mu(s)}{\theta}-\lambda(s)-m\mu(s).$$

Вираз (3) задає функцію розподілу ймовірностей періоду зайнятості в системі $M_t|M_t|m$. Якщо при $s\to\infty$, $p\{\tau_{k,m-1}(t)\le s-t\}\to p^*$, де $p^*<1$, то стаціонарний режим у системі не існує.

Знайдемо найменше m, для якого

$$\lim_{s\to\infty}P\{\tau_{k,m-1}(t)\le s-t\}=1.$$

Для цього задамо ε (мале додатне число) і з точністю до ε будемо обчислювати розподіл (3), починаючи з $m=1$. При фіксованому m інтеграл у правій частині (3) можна обчислювати, наприклад, за формулою прямокутників

$$F_k(t,s)=P\{\tau_{k,m-1}(t)\le s-t\}\approx$$

$$\approx m\cdot h\sum_{k=0}^{n-1}q_k(t,\upsilon_k)\mu(\upsilon_k),$$

де $t=\upsilon_0<\upsilon_1<\ldots<\upsilon_n=s$, $\upsilon_k=t+kh$, $h=\frac{s-t}{n}$, починаючи з $s=t$, збільшуючи значення s з кроком h_1 до тих пір, поки значення $F_k(t,s_i)$ та $F_k(t,s_{i+1})$ не будуть відрізнятись за абсолютною величиною не більше, ніж на ε_1 $(s_i=t+ih_1, i\ge1)$.

Для обчислення функції $q_k(t,\upsilon)$, що стоїть під знаком інтегралу в (3) і є розв'язком інтегрального рівняння Вольтерра другого роду (4), можна застосувати метод скінченних сум [6]

$$q_{km}(t,u_j)=\rho_{m-k}(t,u_j)-mh_2\sum_{k=0}^{j-1}q_{km}(t,u_k)\mu(u_k),$$

де $u_j=t+j\cdot h_2$, $h_2=\frac{s-t}{N}$, $j=0,1,\ldots,N$, $u_N=s$.

Для обчислення ймовірностей $\rho_k(t,s)$ (5) при великому κ застосування формул наближеного обчислення визначених інтегралів типу прямокутників, трапецій, Симпсона неможливе, оскільки підінтегральна функція в (5), як можна показати, звівши криволінійний інтеграл до визначеного (доведення наведемо нижче), швидко осцилює. Для цього випадку є доцільним застосування методу Філона [7], що призначений якраз для обчислення інтегралів від функцій, які швидко осцилюють.

Розрахункові формули цього методу мають вигляд

$$\int_a^b f(p)\cos xpdp\approx H\{\alpha[f(b)\sin xb-$$

$$-f(a)\sin xa]+\beta C_{2s}+\gamma C_{25-1}\},$$

де C_{2s} означає суму всіх парних ординат кривої $y=f(p)\cos xp$, що знаходяться між a та b, за виключенням першої та останньої ординати; C_{2s-1} – сума всіх непарних ординат, а величини α, β, γ, що є функціями від $\theta=xH$ (H – інтервал поділу; $[a;b]$ ділиться на $2n$ рівних частин) визначаються виразами:

$$\theta^3\alpha=\theta^2+\theta\sin\theta\cos\theta-2\sin^2\theta,$$

$$\theta^3\beta=2[\theta(1+\cos^2\theta)-2\sin\theta\cos\theta],$$

$$\theta^3\gamma=4[\sin\theta-\theta\cos\theta].$$

Для інтегралу, що містить $\sin xp$:

$$\int_a^b f(x)\sin xpdp\approx H\{-\alpha[f(b)\cos xb-$$

$$-f(a)\cos xa]+\beta S_{2s}+\gamma S_{2s-1}\},$$

де S_{2s} – сума всіх парних ординат кривої $y=f(p)\sin xp$, що знаходяться між a та b, за

виключенням половини першої та останньої ординати, S_{2s-1} – сума всіх непарних ординат, а величини α, β, γ мають попередній смисл.

Вираз для $\rho_k(t,s)$ через визначений інтеграл можна знайти, використовуючи заміну $\theta = e^{i\varphi}$ враховуючи, що $\mathrm{Im}\,\rho_k(t,s) = 0$, та представляючи $e^{i\varphi}$ як $\cos\varphi + i\sin\varphi$.

Після ряду перетворень (з огляду на їх громіздкість вони опущені), одержимо вираз

$$\rho_k(t,s) =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} e^{A(t,s,\varphi)}\cos B(t,s,\varphi)\cdot\cos k\varphi d\varphi +$$

$$+\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} e^{A(t,s,\varphi)}\sin B(t,s,\varphi)\sin k\varphi du, \quad (6)$$

де

$$A(t,s,\varphi) = \int_t^s\left(\sum_{l=1}^{\infty}\lambda_l(u)\cos l\varphi + \right.$$

$$\left. + m\mu(u)\cos\varphi - \lambda(u) - m\mu(u)\right)du,$$

$$B(t,s,\varphi) = \int_t^s\left(\sum_{l=1}^{\infty}\lambda_l(u)\sin e\varphi - m\mu(u)\sin\varphi\right)du.$$

У правій частині (6) маємо при великому κ суму двох інтегралів від функцій, що швидко осцилюють, і які можна наближено обчислити за методом Філона. При малих κ розрахункові формули цього методу переходять в формулу Симпсона.

Результати статті можуть бути використані для розрахунку оптимального числа обслуговуючих приладів в реальних системах обслуговування вказаного вище типу та на стадії їх проектування.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гнеденко Б. В. О задачах теории массового обслуживания. Теория массового обслуживания // Тр. Всесоюзного совещания школы по теории массового обслуживания. Дилижан 1970. Изд-во МГУ. 1972.
2. Абольников Л. М. Переходной режим в системе M|M|n с неординарным входящим потоком // Известия АН СССР: Техническая кибернетика. 1970. № 5.
3. Кендалл Д. Стохастические процессы, встречающиеся в теории очередей, и их анализ методом вложенных цепей Маркова // Математика. 1959. № 3:6.

Надійшла до редколегії 29.09.03.

УДК 656.2

Г. Н. КИРПА (Министерство транспорта Украины)

ВЫБОР МИНИМАЛЬНОГО РАДИУСА КРИВЫХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

У статті розглядаються зарубіжні норми проектування високошвидкісних залізниць і вплив мінімального радіуса кривої на вартісні показники траси. Даються рекомендації щодо застосування тих чи інших норм.

В статье рассматриваются зарубежные нормы проектирования высокоскоростных железных дорог и влияние минимального радиуса кривой на стоимостные показатели трассы. Даются рекомендации по применению тех или иных норм.

In article foreign norms of designing of high-speed railways and influence of the minimal radius of a curve on cost indexes of a line are examined. Recommendations on application of those or other norms are given.

Одним из элементов интеграции железных дорог Украины в европейскую транспортную систему является повышение скорости. Украина достаточно уверенно движется в этом направлении [1]. Осуществлен пуск двух «Столичных экспрессов» [2], исследуется возможность введения в Украине высокоскоростного движения [3].

Как известно, одним из важнейших параметров проектирования высокоскоростных трасс является минимальный радиус кривых. В разных странах применяются различные нормы (табл. 1) [4].

Таблица 1

Параметры	Страны и максимальные скорости, км/ч									
	Франция		Германия			Италия		Испания		Бельгия
	300	350	300		350	300	350	300	350	300
Тип движения	Пасс.	Пасс.	Пасс.-груз.	Пасс.	Пасс.	Пасс.-груз.	Пасс.-груз.	Пасс.	Пасс.	Пасс.
Максимальная проектная скорость, км/ч	300	350	300	300	350	250–300	350	270	350	320
Максимальная реализованная скорость, км/ч	300	320	300	300	330	300	350	270	> 300	300
Минимальный радиус кривых для максимальной скорости, м	4 000	6 250	4 000	3 350	5 120	5 450	7 000	4 000	6 500	4 800

Поскольку сегодня Украина в вопросе высокоскоростного движения ориентируется на французский опыт, целесообразно рассмотреть именно его. По данным французских железных дорог (SNCF), для минимального радиуса кривых представлен достаточно широкий диапазон значений, зависящий как от условий рельефа, так и от максимальной скорости движения поездов (табл. 2).

Так, при росте максимальной скорости в 1,5 раза минимальный радиус увеличивается практически в два раза. Во-вторых, проектирование линии с каким-либо предельным значением максимальной скорости делает практически невозможным перевод этой линии на более высокую скорость в будущем. Это связано, прежде всего, с тем, что рекомендованный радиус для более низкой категории скоростей не допускается для более высокой скорости даже в трудных условиях.

Таким образом, выбор максимальной скорости движения и минимального радиуса кривых является чрезвычайно ответственной задачей. Он предопределит работу данной линии на

длительный период, поскольку разработки составов с принудительным наклоном кузова для скоростей 300–350 км/ч находятся пока только в стадии идей.

Таблица 2

Минимальный радиус кривых, м	Максимальная скорость, км/ч		
	270	300	350
Рекомендованный	3 846	4 545	7 143
Допустимый	3 226	4 000	6 250
В трудных условиях	3 125	4 000	5 556

При вписывании в угол поворота α (рад) двух кривых радиусами R_1 и R_2 длина пути по участку с меньшим радиусом (первый вариант) оказывается больше (рис. 1).

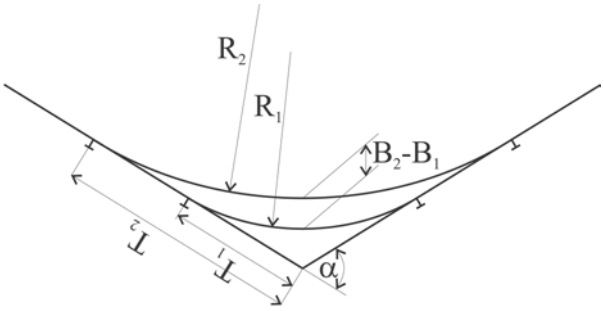


Рис. 1

Разность в длине пути L_1 и L_2 составит

$$\Delta L = \left(R_2 - R_1\right)\left(2\,\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2} - \alpha\right).$$

Поскольку для высокоскоростной линии доля затрат, пропорциональных длине линии, достаточно высока, имеет смысл оценить уменьшение этих затрат.

С использованием результатов исследований французских специалистов фирмы «СИСТРА» [3] были получены некоторые значения [5], которые позволяют в предварительных расчетах принять стоимость 1 км высокоскоростной линии в размере 5 млн евро, стоимость земляных работ и искусственных сооружений – в размере 2,64 млн евро на 1 км, расходы по эксплуатации линии – 280 тыс евро на 1 км в год. Если взять период сравнения вариантов 20–30 лет, то отношение k приведенных линейных затрат $a_{\text{лин}}$ к стоимости земляных работ и искусственных сооружений в средних условиях $a_{\text{зр-норм}}$ составит $5:2$.

Стоимость земляных работ и искусственных сооружений при увеличении радиуса кривой, как правило, возрастает. Оценим, какое увеличение этой стоимости можно допустить при увеличении радиуса (дополнительные затраты на замедление и разгон в кривой меньшего радиуса не учитываются).

Если затраты по первому и второму вариантам равны, то мы имеем

$$L_1 a_{\text{лин}} + K_1^{\text{зр}} = L_2 a_{\text{лин}} + K_2^{\text{зр}},$$

где $K_1^{\text{зр}}$, $K_2^{\text{зр}}$ – затраты на земляные работы и искусственные сооружения по первому и второму вариантам соответственно.

Тогда допустимое увеличение стоимости земляных работ и искусственных сооружений ΔK в процентах составит

$$\Delta K = \frac{100\left(K_2^{\text{зр}} - K_1^{\text{зр}}\right)}{K_1^{\text{зр}}} = 100\frac{a_{\text{лин}}\left(L_1 - L_2\right)}{a_{\text{зр-норм}} L_1} = 100k\left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right).$$

Приведенные затраты составят:

– в первом варианте при радиусе R_1

$$K_1 = L_1 a_{\text{лин}} + L_1 a_{\text{зр-норм}};$$

– во втором варианте при радиусе R_2

$$K_2 = L_2 a_{\text{лин}} + L_2\left(a_{\text{зр-норм}} + \frac{\Delta a \cdot a_{\text{зр-норм}}}{100}\right),$$

где Δa – увеличение в процентах стоимости 1 км земляных работ и искусственных сооружений за счет большего радиуса.

Приравняв K_1 и K_2 и выполнив некоторые преобразования, получим

$$\Delta a = 100\left(1 + k\right)\left(\frac{L_1}{L_2} - 1\right).$$

Выполнив расчеты при $R_2 = 6\,500$ м и $R_1 = 3\,000 \ldots 6\,000$ м для кривых с различными значениями угла поворота α, получим следующий график (рис. 2).

Как видно из графика, применение большего радиуса кривой при больших углах поворота позволяет за счет сокращения длины трассы увеличить расходы на земляные работы и искусственные сооружения почти на 15 %. При этом стоимость 1 км этих расходов может быть увеличена на 20 %.

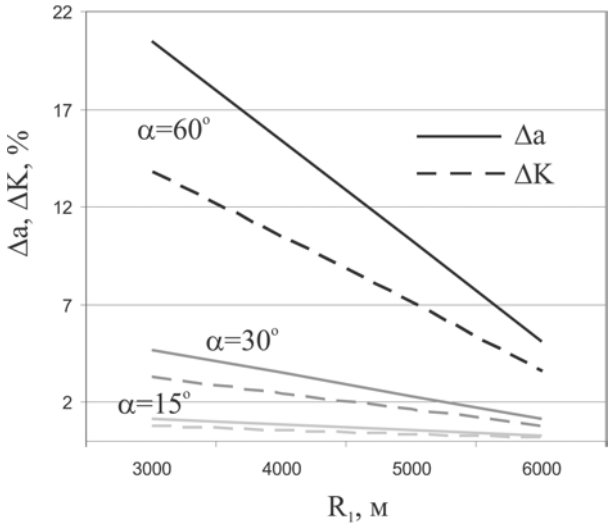


Рис. 2

При применении большего радиуса кривой трасса в средней части сдвигается на величину, равную разности биссектрис. Как показали расчеты, разность биссектрис $\Delta B = B_2 - B_1$ практически линейно зависит от Δa (рис. 3).

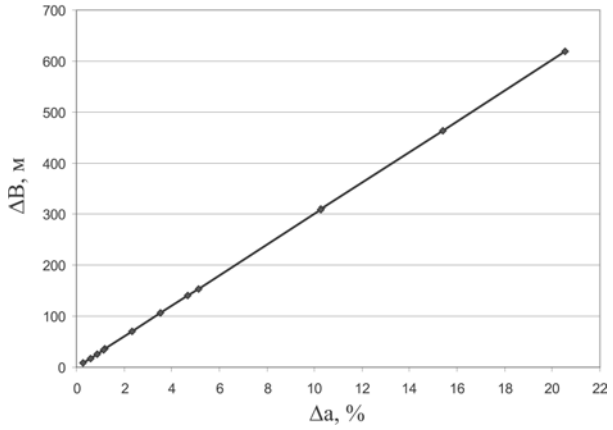


Рис. 3

Анализ этого графика показывает, что сдвижка средней части кривой может достигать значительных величин (600 м и более). Понятно, что в этом случае рельеф в районе трассы может существенно измениться.

Были сделаны расчеты для оценки изменения рабочей отметки земляного полотна, при котором приведенные затраты по вариантам с меньшим и большим радиусом будут приблизительно равны. Как и в предыдущем случае, данную зависимость удобно построить от величины Δa. Приняв

$$\Delta a = 100\frac{S_2 - S_1}{S_1},$$

где S_1 и S_2 – площади поперечных сечений земляного полотна в первом и втором вариантах соответственно, и выполнив преобразования, получим зависимость

$$\Delta a = 100\left\{\frac{\Delta h}{h_1}\left[1 + \frac{h_1}{b + nh_1}\left(1 + n\frac{\Delta h}{h_1}\right)\right]\right\},$$

где Δh – допустимое изменение рабочей отметки, м; h_1 – рабочая отметка в первом варианте, м; b – ширина основной площадки земляного полотна, м; n – крутизна откосов земляного полотна.

Решив получившееся квадратное уравнение, построим зависимость Δh от Δa (рис. 4).

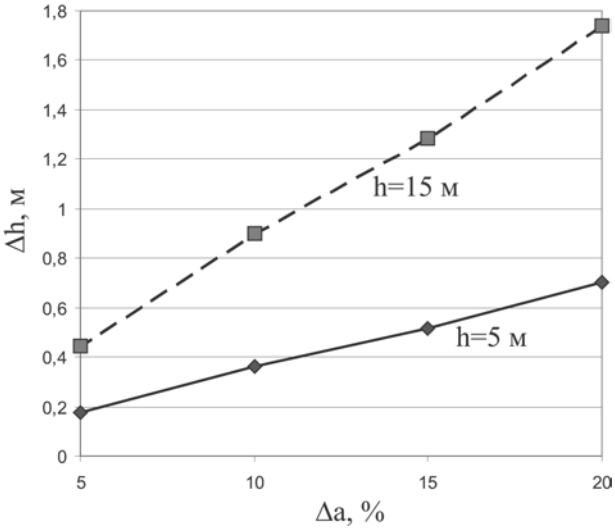


Рис. 4

Из рисунка следует, что даже при достаточно больших значениях Δa допустимое изменение рабочей отметки не достигает 2 м, и это при уходе трассы почти на 600 м в сторону.

Таким образом, расчеты показывают, что замена меньшего значения радиуса большим будет эффективна только в условиях относительно спокойного рельефа. В условиях сложного рельефа экономически оправданным будет переход на значения радиуса, допустимые в трудных условиях. А это, в свою очередь, сделает практически невозможным повышение скорости движения на таких участках в будущем.

Поэтому выбор максимальной скорости движения поездов на высокоскоростной линии и соответственно минимального радиуса кривой являются чрезвычайно ответственным шагом, от которого будет зависеть дальнейшая судьба данной линии на протяжении десятков, а то и сотен лет.

В приведенном исследовании не рассматривались варианты прохождения трассы в тоннелях и на виадуках, где зависимость стоимости от сдвига трассы будет не столь существенной.

Не рассмотрены также дополнительные эксплуатационные затраты в кривых меньшего радиуса, связанные с уменьшением скорости и дополнительным износом пути и подвижного состава. Все это может послужить предметом для дальнейшего исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кірпа Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему: Монографія. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Арт-Прес, 2003. – 268 с.
2. Кирпа Г. Н. Стратегия взаимодействия // Залізничний транспорт України. 2003. – № 6. – С. 2–7.
3. Предварительное технико-экономическое обоснование проекта высокоскоростных железных дорог на Украине: Окончательный отчет / Министерство транспорта Украины. Государственная администрация железнодорожного транспорта Украины. – К., 2002. – 311 с.
4. Design of New Lines for Speeds of 300–350 km/h. State of the Art. First Report / International Union of Railways (UIC) – Paris, 2001. – 54 p.
5. Кирпа Г. Н., Корженевич И. П., Курган Н. Б. Перспективы внедрения сети высокоскоростных железных дорог в Украине // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. тр.: В 3-х т. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2003. – Т. 1. С. 511–518.

Поступила в редколлегию 23.01.04.

УДК 656.224.027:625.113

Б. П. ПІХ (Львівська залізниця), І. П. КОРЖЕНЕВИЧ, М. Б. КУРГАН (ДІІТ)

ВИКОРИСТАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З РОЗСУВНИМИ КОЛІСНИМИ ПАРАМИ НА НАПРЯМКУ КИЇВ–ЛЬВІВ–МОСТИСЬКА ІІ

Наведені аналіз траси і результати динамічних випробувань вагонів з розсувними колісними парами на напрямку Київ–Львів.

Приведены анализ трассы и результаты динамических испытаний вагонов с раздвижными колесными парами на направлении Киев–Львов.

The article provides the analysis of track and the results of dynamic tests of cars with extensible wheelsets on the railway direction Kyiv–Lviv.

Вступ

Через значне скорочення в останні роки обсягів вантажних перевезень пропускна спроможність більшості залізничних ліній для пасажирського руху більше ніж у два рази перевершує існуючі потреби. Однак при цьому спостерігається не ріст, а зменшення міжнародних пасажирських перевезень залізницею. Причинами є велика тривалість перебування пасажирського поїзда в дорозі (необхідність зміни візків при переході з однієї колії на іншу, понижені швидкості руху через наявність бар'єрних місць на ділянках транспортних коридорів та ін.). Крім великих втрат часу (3–4 години), має місце недостатня кількість і протяжність ділянок обігу вагонів. У даний час вагони курсують тільки в сполученні Київ–Вроцлав, Київ–Варшава, Київ–Прага, і невелика їхня кількість направляється у Відень, Берлін і Братиславу. Через розходження в конструкції не всі вагони європейських залізниць можуть переставлятися на ширококолійні залізниці країн СНД.

Щоб виправити таке становище, Укрзалізниця здійснила ряд кроків. У червні 2003 р. на пунктах перестановки на станції Мостиська ІІ почала діяти оригінальна колієперевідна система SUW-2000, яка забезпечує автоматизований перехід рухомого складу з колії 1520 на 1435 мм і навпаки. А з грудня 2003 р. заплановано регулярне пасажирське сполучення Київ–Вроцлав–Відень із застосуванням поїзда з розсувними колісними парами [1].

Постановка задачі. Аналіз вихідних даних

Мета роботи – це аналіз параметрів траси від Києва до західного кордону України і оцінка динамічних характеристик рухомого складу з розсувними колісними парами, застосування якого дозволить підвищити маршрутну швидкість.

Основним залізничним напрямком, що з'єднує Україну з країнами Центрально-Східної Європи і країнами Європейського Союзу, є двоколійна електрифікована лінія Мостиська ІІ–Львів–Жмеринка–Київ–Зернове. Цей напрямок є частиною Міжнародного транспортного коридору № 3 (Берлін/Дрезден–Катовіце–Львів–Красне–Тернопіль–Жмеринка–Козятин–Київ–Зернове–Суземка–Москва), довжина якого становить 2209 км.

Уведення в 1998 р. електричної тяги на ділянці Тернопіль–Гречани дозволило створити цілком електрифікований хід від Києва до Львова з виходом у Європу. Ефективність проведення таких заходів розглянута в роботі [2]. На даний час вся траса двоколійна й електрифікована.

Двоколійна ділянка у межах Львівської залізниці складає 39 % від довжини коридору № 3 у межах України. Із них 84 км (державний кордон з Польщею – Львів) електрифіковані на постійному струмі. Для пасажирського руху використовується електровоз ВЛ10, маса поїзда 700 т. Від Львова до Києва залізниця експлуатується на змінному струмі, на ділянці Львів–Жмеринка використовується електровоз ВЛ50, від Жмеринки до Києва ЧС4, ЧС8, маса поїзда 1100 т. Маршрутна швидкість поїзда № 7 Київ–Братислава–Відень на ділянці Київ–Львів становить 60,6 км/год, що на сьогодні не є достатнім показником.

До недоліків цього ходу можна віднести зміну струму (на ділянці Мостиська II–Львів постійний струм, від Львова до Києва – змінний струм) і відносно складні параметри поздовжнього профілю і плану, особливо у межах Львівської залізниці. Тому характеристика третього міжнародного транспортного коридору з точки зору параметрів траси представлена у вигляді гістограм розподілу уклонів і радіусів кривих у межах України взагалі і Львівської залізниці зокрема (рис. 1, 2).

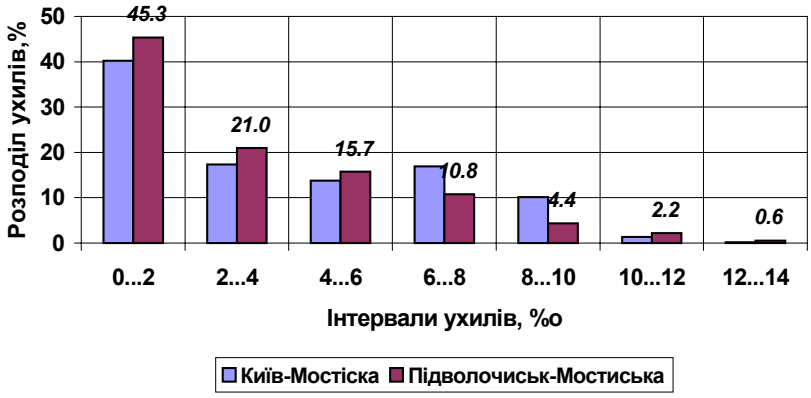


Рис. 1. Гістограми розподілу уклонів

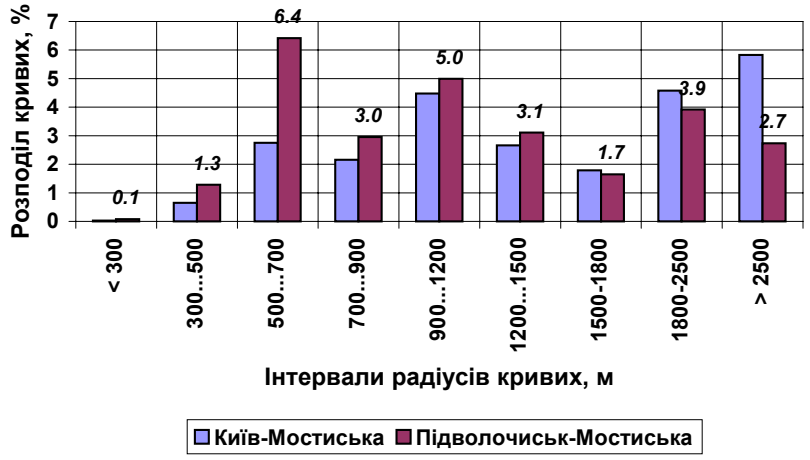


Рис. 2. Гістограми розподілу радіусів кривих

Порівняння параметрів тут і далі виконується відносно Львівської залізниці. Найбільші уклони на цьому напрямку сягають 14 ‰, питома вага кривих ділянок 27,1 %, мінімальний радіус – 250 м.

З гістограм видно, що у межах Львівської залізниці, на ділянці Мостиська II–Підволочиськ уклони крутіші за 10 ‰, складають 2,8 % проти 1,6 % від всього напрямку. Таке ж порівняння не на користь питомої ваги кривих радіусів до 700 м: 7,8 % у межах Львівської залізниці проти 3,4 % від Мостиськи II до Києва.

Відповідність технічних і експлуатаційних параметрів транспортного коридору № 3 європейським вимогам розглянута в роботі [3].

Автоматизований перетин кордонів у міжнародному сполученні

Пасажирські перевезення у міжнародному сполученні за умовами комфорту та за швидкостями руху повинні відповідати положенням угод щодо трансєвропейських транспортних коридорів. Для підвищення ефективності залізничного сполучення з країнами Центральної і Західної Європи необхідно вирішити проблеми адаптації рухомого складу до експлуатаційних умов на залізницях різних стандартів. До цих проблем належать габаритні обмеження та конструктивно-технологічні розбіжності у виконанні систем зчеплення, гальм, ходових частин, енергозабезпечення та іншого обладнання, що визначає швидкісні характеристики рухомого складу при заданому рівні безпеки руху та комфорту.

Що стосується проблем адаптації систем зчеплення і гальм, то сьогодні вже існують відпрацьовані варіанти технічних рішень, які сприятимуть прискоренню пасажирських перевезень у міжнародному сполученні [4].

Останнім часом зростає інтерес до запровадження технології переведення вагонів з колії одного стандарту на колію іншого стандарту в автоматичному режимі з використанням так званих розсувних колісних пар (РКП).

Розробки РКП мають столітню історію (перші патенти з даної тематики стали з'являтися ще з 1896 р.). Впровадження їх стримувалося складністю конструкцій і вимагало значних витрат на технічне обслуговування. Практичне застосування РКП розпочато в 1969 р., коли з Барселони до Женеви прибув перший поїзд системи Talgo RD.

З 1969 р. пасажирські поїзди Talgo, обладнані цією системою, введені в регулярну експлуатацію. У даний час фірмою Talgo пропонується нове технічне рішення. Із цією метою розроблена конструкція колісної пари з колесами, що розсовуються [5]. Такі колісні пари встановлюються у візках типу В21, аналогічних візкам У25, що є стандартними для вантажних вагонів колії 1435 мм.

Нині, крім іспанської системи Talgo, для міжнародних пасажирських сполучень застосовуються РКП конструкції доктора Р. Сувальського (Польща) – так звана система SUW2000, яку призначено як для пасажирських, так і для вантажних вагонів [6]. Серед новітніх систем РКП система SUW2000 є найбільш відпрацьованою. Вагони, обладнані РКП даної системи, переходять з однієї колії на іншу за лічені секунди проїздом через колієперевідний пристрій довжиною 27 м із швидкістю руху до 30 км/год. При цьому не потрібно розвантажувати колеса, як цього вимагає, наприклад, система Talgo.

Система SUW2000 дозволяє отримувати три різні відстані між колесами 1435/1520/1668 мм, забезпечувати максимальну швидкість руху 120 км/год при навантаженні на вісь 200…225 кН і 160 км/год – при 160 кН/вісь.

У квітні 2000 року поїзд, складений із трьох пасажирських і трьох вантажних вагонів типу «Схід–Захід», обладнаних ходовими частинами з РКП системи SUW2000, здійснив презентаційний рейс від ст. Замосць (Польща) до ст. Ковель Львівської залізниці. Із грудня 2000 р. у експлуатації знаходиться пасажирський поїзд Варшава–Вільнюс.

Ідея застосування РКП є привабливою перш за все в тім, що позбавляє пасажирів незручностей при перетині кордону, підвищуючи тим самим рівень комфортності. Крім соціального ефекту, застосування РКП приносить економічні вигоди, оскільки дає змогу позбутися застарілої технології переставляння вагонів. Термін окупності капітальних витрат, пов'язаних із впровадженням технології автоматичного переходу пасажирських поїздів з колії 1520 мм на колію 1435 мм і назад із застосуванням візків, обладнаних РКП, не перевищить шести років [4].

У відповідності зі спільним рішенням Укрзалізниці й Польських залізниць, у червні 2001 р. на Львівській залізниці було проведено ходові динамічні випробування вагонів на візках типу 25AN/S з РКП системи SUW2000. Дослідний поїзд складався з пасажирського і критого вантажного вагонів колії 1435/1520 мм, вагона-лабораторії ДІІТ і піввагона колії 1520 мм. Вагон-лабораторія і піввагон служили вагонами-еталонами, показники динамічних якостей яких порівнювалися з аналогічними показниками дослідних вагонів.

Порівнюючи показники W_Z, визначені за вертикальним прискоренням, було встановлено, що хід вагона на візках типу 25AN/S був дещо спокійніший, ніж вагона на візках типу КВЗ-ЦНИИ. В обох випадках значення W_Z не перевищували допустимого рівня – 3,25, що згідно з таблицею [7] характеризується як задовільний хід. Щодо показників W_y, які визначалися за горизонтальним прискоренням, то вони були меншими у порівнянні з першим випадком $\left(\max W_y = 2,6\right)$ і при швидкостях руху 80 км/год і вище виявились близькими для обох вагонів [8].

Таблиця

Допустимі значення прискорень кузова пасажирського

Оцінка ходу вагона	Прискорення в частках g			
	вертикальні прискорення $\ddot{Z}$		горизонтальні прискорення $\ddot{Y}$	
	Порожній	Навантажений	Порожній	Навантажений
Відмінний	0,15	0,12	0,07	0,05
Добрий	0,20	0,15	0,12	0,10
Задовільний	0,25	0,20	0,15	0,12

На рис. 3 і 4 наведені графіки прискорень $Z3$ і $Z4$, що реєструвались з некотлової сторони вагона. Із цих же графіків видно, що найбільші максимальні прискорення виникали у першому випадку в діапазоні швидкостей 70…90 км/год, у другому – при максимальній швидкості 100 км/год. З аналізу графіків вертикальних прискорень кузова вагона (рис. 3, 4) видно, що у діапазоні швидкостей руху 40…100 км/год рівень прискорень змінюється плавно з ростом швидкості. Середні з максимальних значень вертикальні прискорення вагона на візках 25AN/S не перевищують 0,15g, а вагона на візках КВЗ-ЦНИИ не перевищують 0,10g, що свідчить про відмінний хід вагона.

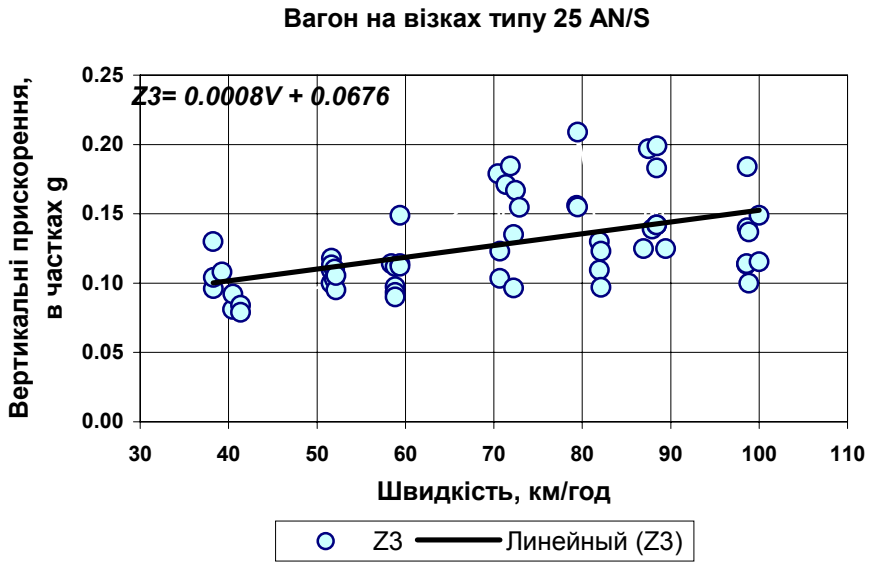


Рис. 3. Залежність вертикальних прискорень кузова вагона на візках типу 25AN/S від швидкості руху

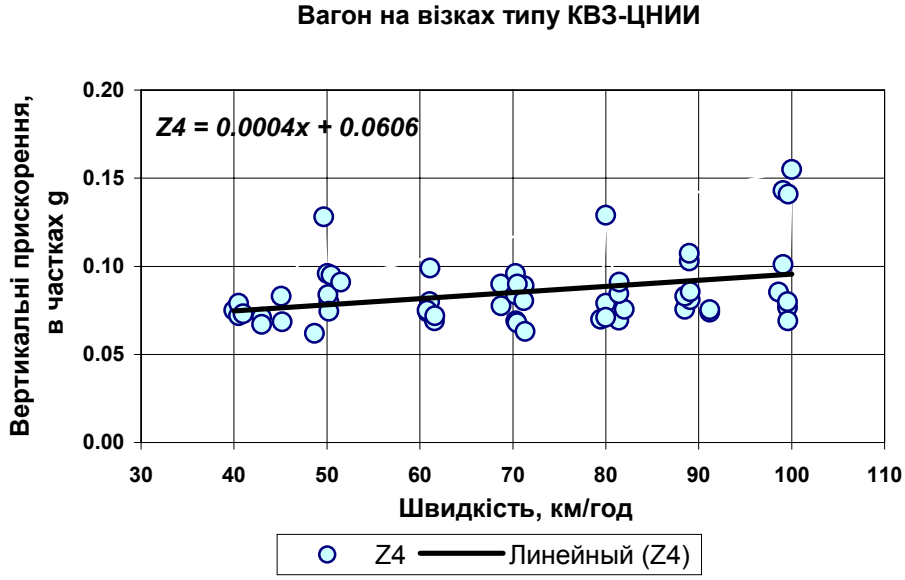


Рис. 4. Залежність вертикальних прискорень кузова вагона на візках типу КВЗ-ЦНИИ від швидкості руху

На рис. 5 показані гістограмми, з яких видно різницю вертикальних прискорень для вагонів на візках 25AN/S і КВЗ-ЦНИИ. Така різниця тим більша, чим більша швидкість руху у відношенні до вагона-еталона (на візках КВЗ-ЦНИИ) і досягає майже 0,12g, рис. 6.

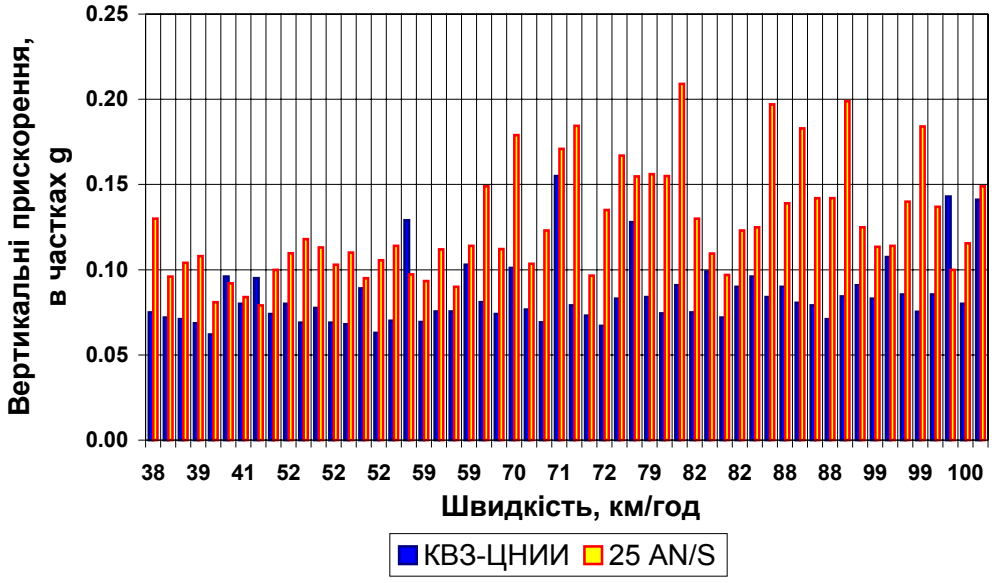


Рис. 5. Розподіл вертикальних прискорень кузова вагонів залежно від швидкості руху

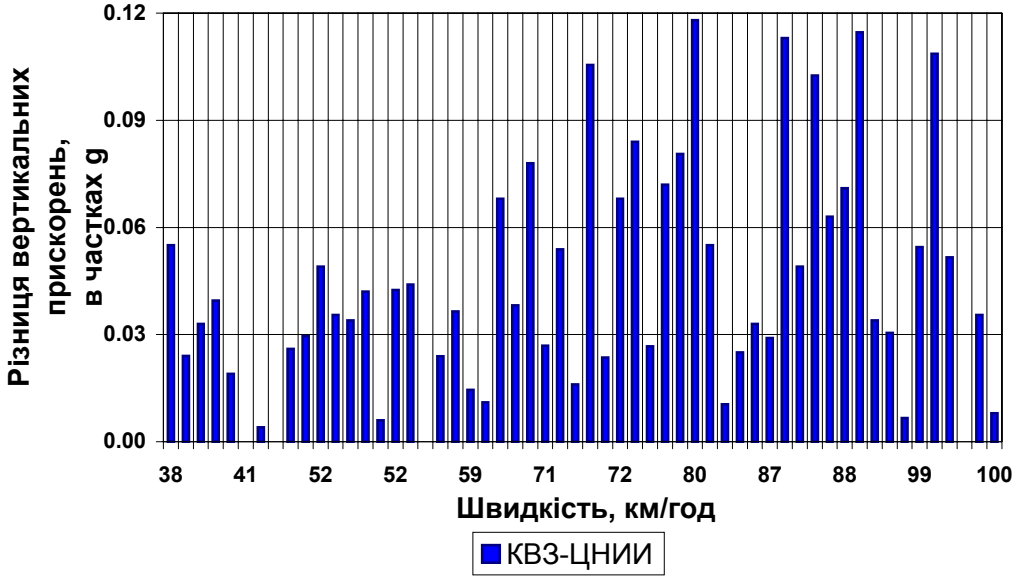


Рис. 6. Різниця вертикальних прискорень кузова вагона на візках 25AN/S відносно вагона на візках КВЗ-ЦНИИ

На рис. 7 і 8 наведені графіки прискорень $Y3$ і $Y4$, що реєструвались з некотлової сторони вагона. Із цих же графіків видно, що найбільші максимальні прискорення виникали у першому випадку в діапазоні швидкостей 70…90 км/год, у другому – при максимальній швидкості 100 км/год. З аналізу графіків горизонтальних прискорень кузова вагона (рис. 7, 8) видно, що у діапазоні швидкостей руху 40…100 км/год рівень прискорень змінюється плавно з ростом швидкості. Середні з максимальних значень горизонтальні прискорення не перевищують 0,1g. Середні значення горизонтальних прискорень становлять (0,09…0,10)g для вагона на візках 25AN/S і (0,08…0,09)g для вагона на візках КВЗ-ЦНИИ. Згідно з таблицею хід вагонів оцінюється між добрим і відмінним.

На рис. 3, 4 і 7, 8 показано графіки залежностей вимірюваних величин від швидкості руху.

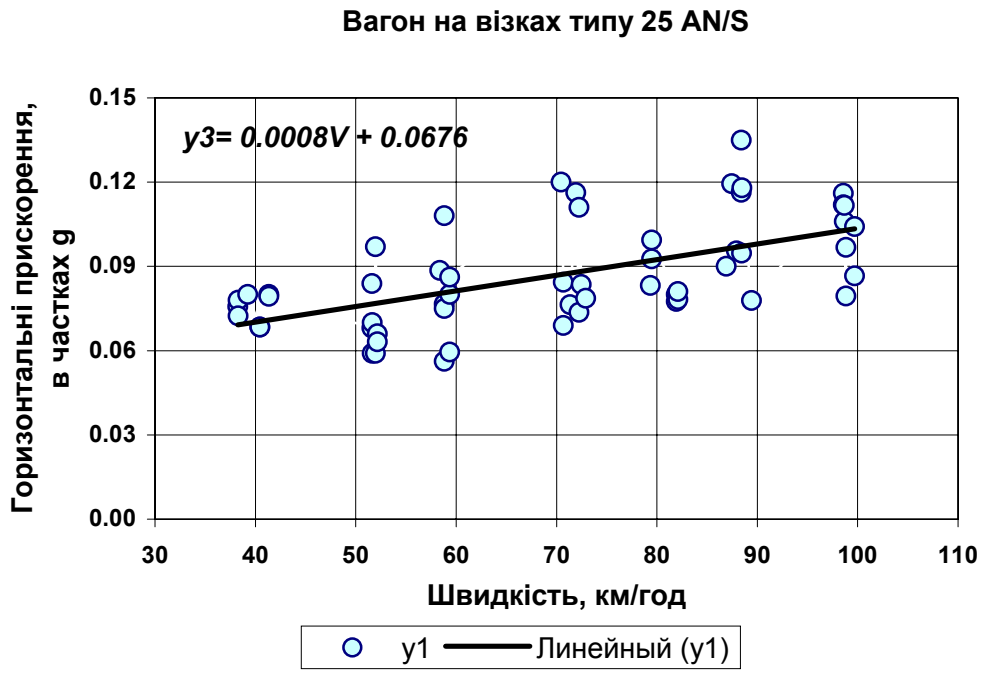


Рис. 7. Залежність горизонтальних прискорень кузова вагона на візках типу 25AN/S від швидкості руху

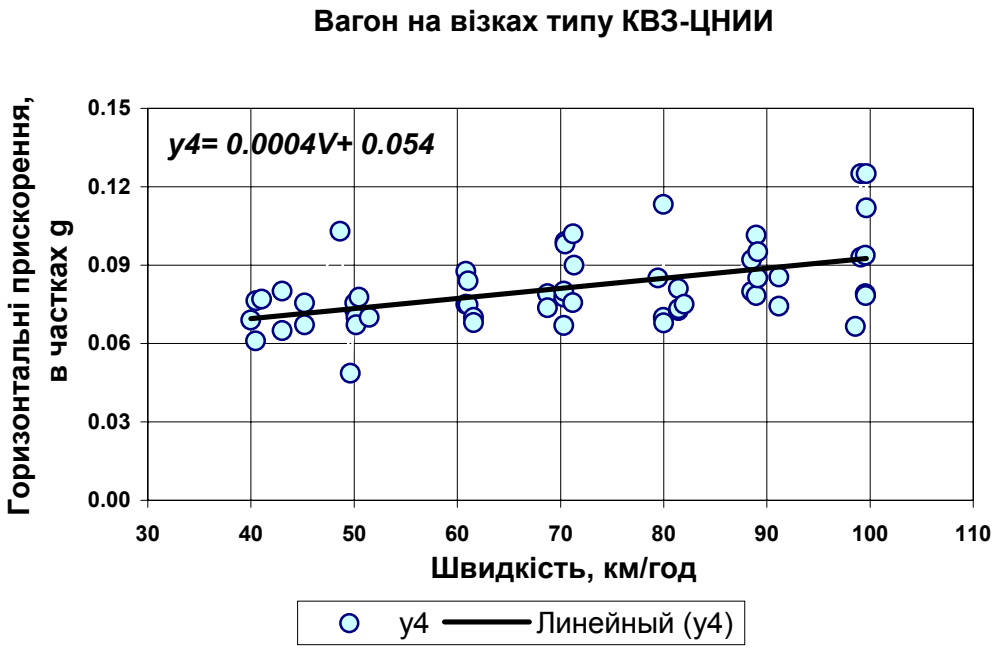


Рис. 8. Залежність горизонтальних прискорень кузова вагона на візках типу КВЗ-ЦНИИ від швидкості руху

На рис. 9 показані гістограмми, з яких видно різницю горизонтальних прискорень для вагонів на візках 25AN/S і КВЗ-ЦНИИ. Така різниця тим більша, чим більша швидкість руху у відношенні до вагона-еталона і досягає (0,04…0,06)g при швидкості, більшій за 85 км/год, рис. 10.

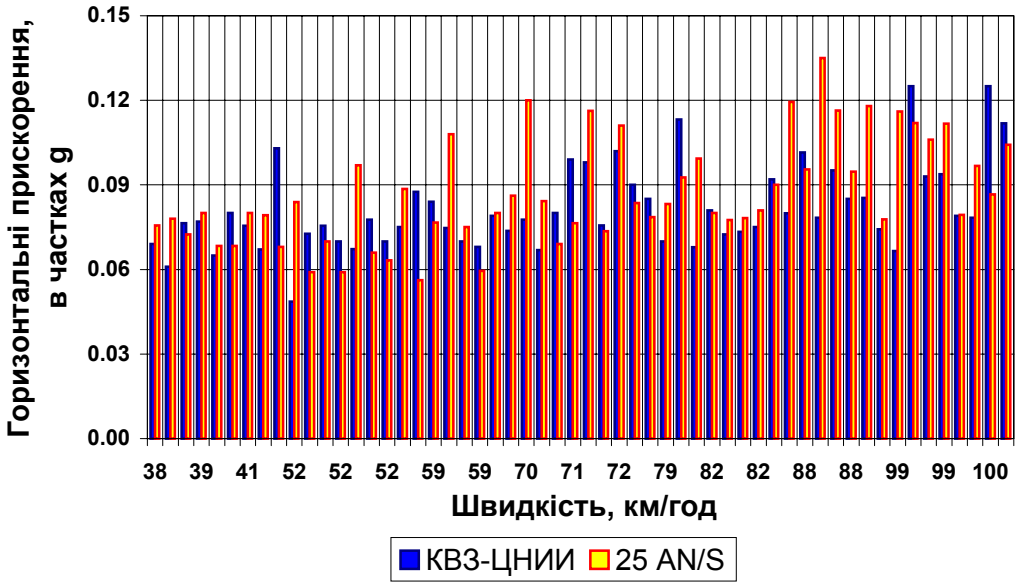


Рис. 9. Розподіл горизонтальних прискорень кузова вагонів залежно від швидкості руху

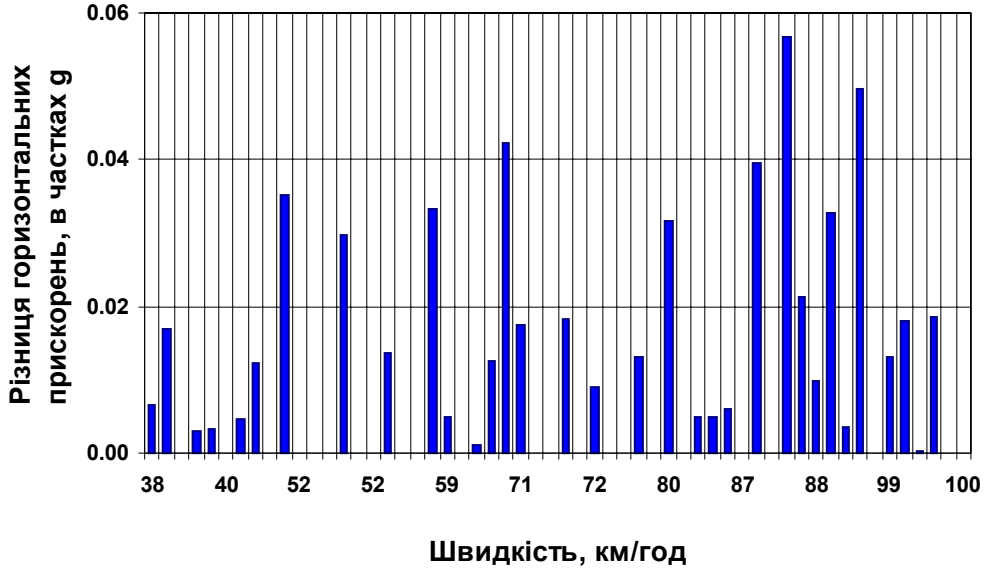


Рис. 10. Різниця горизонтальних прискорень кузова вагона на візках 25AN/S відносно вагона на візках КВЗ-ЦНИИ

Висновки

1. За результатами статистичного аналізу контрольованих динамічних процесів, зареєстрованих під час руху дослідного поїзда за маршрутом Львів-Жмеринка-Київ, встановлено, що рівень вимірюваних величин, які характеризують динамічні властивості вагонів, обладнаних візками типу 25AN/S з розсувними колісними парами системи SUW2000, знаходився в межах, допустимих для експлуатації. Зокрема, хід дослідного вагона за вертикальними прискореннями кузова оцінено як відмінний, за горизонтальними прискореннями - між відмінним і добрим.

2. За своїми динамічними характеристиками вагони габариту РЩ, обладнані візками типу 25AN/S з розсувними колісними парами системи SUW/2000, можуть бути допущені до експериментальної експлуатації на залізницях колії 1520 мм у відповідності до умов угоди між УЗ і ПКП.

3. Переходи вагонів через колієперевідний пристрій на ст. Мостиська II Львівської заліз-

ниці виконано без зауважень щодо роботи механізмів розсувних колісних пар.

4. Випробування показали, по-перше, що візки з розсувними колісними парами забезпечують необхідну плавність ходу на колії 1520 мм, а по-друге, що візки типу КВЗ-ЦНИИ за своїми динамічними характеристиками не поступаються швидкісним візкам типу 25AN/S з безколисковим підвішуванням. Останній висновок є додатковим свідченням потенційних можливостей візків типу КВЗ-ЦНИИ щодо забезпечення у найближчому належних динамічних характеристик вагонів швидкісних поїздів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Кирпа Г. Н. Стратегия взаимодействия // Залізничний транспорт України. – 2003. № 6. – С. 2–7.
2. Кірпа Г. М., Корженевич І. П., Курган М. Б. Дослідження умов підвищення швидкостей руху поїздів на існуючих дільницях в залежності від параметрів траси // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів, поїздів та нафтопроводів: Пр. Зах. наук. центру. – Львів: Логос, 2002. – № 9. – С. 63–67.
3. Кирпа Г. Н., Корженевич И. П., Курган Н. Б. Исследование условий, обеспечивающих организацию скоростного движения по транспортным коридорам в пределах Львовской железной дороги // Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdow samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. Materialy 7 konf. miedzynarodowej. – Rzeszow: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza, 1998. – S. 153–162.
4. Дьомін Ю. В., Кірпа Г. М. Пасажирським перевезенням швидкість і комфорт // Залізничний транспорт України. –2002. – № 1. – С. 2–6.
5. Изменение ширины колеи по системе Talgo в тележках грузовых вагонов // Железные дороги мира. – 1995. – № 4. – С. 32–38.
6. *Suwalski R. M.* SUW 2000: Wozki towarowe i osobowe w awtomatycznym ruchu przestawczym 1435/1520 mm // Technika transportu szynowego. – 2000. – № 7/8. – S. 32–44.
7. Вершинский С. В., Данилов В. Н, Челноков И. И. Динамика вагона / Под ред. С. В. Вершинского. – М.: Транспорт, 1978. – 352 с.
8. Кірпа Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему: Монография. – Д.: Арт-Пресс, 2003. – 364 с.
9. Програма та методика контрольних динамічних випробувань пасажирських вагонів габариту РІЦ на візках типу 25АМ/5 з розсувними колісними парами 8І-Г/У2000 у графіковому пасажирському поїзді. – КУЕТТ-ДНУЗТ, 2003. – 13 с.
10. РД 24.050.37.95. Вагоны пассажирские и грузовые. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М.: ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
11. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

Надійшла до редколегії 22.10.03.

УДК 629.46.016.5

В. Д. ДАНОВИЧ, В. В. РЫБКИН, А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР,
Н. В. ХАЛИПОВА, А. П. ТРЯКИН (ДИИТ)

К ВОПРОСУ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ ВКАТЫВАНИЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС ДЛЯ ПОРОЖНИХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

У статті розглядаються питання визначення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки для різних моделей порожніх чотиривісних вантажних вагонів з візками моделей 18-100 (ЦНИИ-Х3). Досліджено вплив характеристик вагона на тривалість відрізку часу, протягом якого відбувається вкочування гребеня колеса під час руху вагона по прямій і в кривих малих і середніх радіусів.

В статье рассматриваются вопросы определения устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса для различных моделей порожних четырехосных грузовых вагонов с тележками моделей 18-100 (ЦНИИ-Х3). Исследовано влияние характеристик вагона на время возможного вкатывания гребня колеса при движении вагона по прямой и в кривых малых и средних радиусов.

The paper considers the issues of determining the rates of stability against a wheel flange climb onto the railhead for various models of empty four-axle freight cars with bogie series 18-100. The influence of the car parameters on the period of probable wheel flange climb in running on straight track sections and in negotiating small and medium-radius curves has been investigated.

Работа посвящена изучению влияния параметров порожнего грузового вагона с тележками моделей 18-100 (ЦНИИ-Х3) на показатели безопасности движения и определению предельных скоростей движения по магистральным путям. Результаты получены путем математического моделирования пространственных колебаний системы «грузовой вагон – железнодорожный путь». Основы этого подхода изложены в [1; 2]. Из работ последних лет, посвященных рассматриваемому вопросу, можно упомянуть [3; 4], от которых настоящая работа отличается тем, что в ней рассматривается большее число моделей вагонов и изучается влияние параметров вагона на качественный характер зависимости коэффициента запаса устойчивости против вкатывания гребня колеса на рельс от времени (а не только на его величину).

В период 1991–1992 гг. ДИИТ силами лаборатории динамики и прочности подвижного состава, путеиспытательной и мостоиспытательной лабораторий выполнил на Южно-Уральской железной дороге комплексные исследования воздействия на путь поездов из порожних полувагонов, имеющих в своем составе 300…400 осей [5]. Результаты проведенных исследований показали, что при скорости движения, превышающей 65 км/ч, возникает угроза безопасности движения, связанная с потерей устойчивости порожних полувагонов из-за возможного схода колес.

Выводы ДИИТа подтверждались опытом эксплуатационной работы Южно-Уральской, Куйбышевской и Западно-Сибирской железных дорог, где имели место сходы поездов из порожних полувагонов.

По результатам неоднократных рассмотрений таких сходов на заседаниях экспертной комиссии, а также анализа экспериментальных исследований ДИИТа с целью обеспечения безопасности движения в 1995 г. приказом Укрзалізниці было введено ограничение скорости движения поездов с порожними вагонами до 70 км/ч.

В 1999–2002 гг. в ДИИТе проводились комплексные исследования с целью подготовки приказа по нормам допускаемых скоростей движения подвижного состава на железных дорогах Украины. В рамках этой работы были проведены теоретические исследования по определению допускаемых скоростей движения четырехосных грузовых вагонов на тележках 18–100 (ЦНИИ-Х3) на основе математического моделирования [6]. Моделировалось взаимодействие порожних и груженых четырехосных грузовых вагонов и железнодорожного пути при движении по прямым участкам пути и в кривых радиусом 300 и 600 м. Диапазон исследуемых скоростей движения вагонов 30…90 км/ч с интервалом 20 км/ч.

В качестве возмущений использовались горизонтальные и вертикальные неровности рельсовых нитей, которые были получены путем двукратного интегрирования соответственно горизонтальных и вертикальных ускорений букс грузового вагона.

Теоретические расчеты выполнялись на ПЭВМ с помощью математической модели, разработанной в ДИИТе [7–9] для выбранных типов вагонов. Экипаж рассматривался как многомассовая нелинейная система, состоящая из 11 твердых тел (кузова, двух надрессорных балок, четырех боковых рам тележек и четырех колесных пар), с жесткими и упругофрикционными связями между ними, движущаяся по инерционному упруговязкому пути. Общее число степеней свободы составило 72.

Для исследования были выбраны различные модели грузовых вагонов, обращающихся на сети железных дорог Украины, отличающиеся длиной базы, массой и положением центра тяжести кузова [10–13].

На основании этих исследований было установлено, что скорость движения в прямых участках пути груженых вагонов может составлять до 90 км/ч. В то же время расчет, проведенный для вагонов в порожнем состоянии, показал, что возможна потеря запаса устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса при скорости движения выше 55 км/ч в зависимости от типа исследуемого экипажа [6].

Типы исследованных вагонов и их характеристики в порожнем состоянии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения моментов инерции порожних грузовых вагонов и расстояний от центра масс вагона до уровня головки рельса

Модель вагона	Длина базы, м	Масса, т	Моменты инерций, т·м^2			Положение центра масс z_c, м
			I_x	I_y	I_z	
Крытый вагон 11-217	10,00	24,7	48,10	355,47	346,82	2,29
Крытый вагон 11-280	12,24	26,0	53,10	488,11	478,75	2,31
Полувагон 12-4004	15,69	30,0	53,10	1001,64	925,44	2,06
Полувагон 12-726	8,65	22,0	28,58	268,02	277,33	1,79
Цистерна 15-1443	7,80	23,2	32,20	182,91	175,43	2,23
Цистерна 15-884	11,50	31,3	53,10	488,11	478,75	2,31
Хоппер 20-4015	7,78	25,0	36,28	161,92	169,10	1,99
Хоппер 20-480	5,87	22,0	28,70	80,96	85,91	1,72

Определение допускаемых скоростей движения вагонов выполнялось на основе сравнения динамических показателей и непогашенных ускорений, действующих на кузов вагона в кривых, с рекомендуемыми и допускаемыми значениями [14–16].

Допускаемая скорость движения экипажа определялась на основании оценки устойчивости против вкатывания гребня колеса на рельс по значению коэффициента устойчивости $K_{\text{уст}}$, поскольку для порожних вагонов этот показатель дал наиболее жесткие ограничения. При оценке результатов исходили из того, что запас устойчивости колеса от вкатывания на головку рельса обеспечен, если вероятность появления значения $K_{\text{уст}}$ в диапазоне до 1,3 не превышает 0,001. Действующие в настоящее время допускаемые величины коэффициента устойчивости $\left[K_{\text{уст}}\right] \le 1{,}3$ приведены в [15].

В данной статье рассматривается влияние на устойчивость против вкатывания колеса скорости движения и характеристик экипажа.

На рисунках 1, 2 приведены зависимости коэффициента устойчивости набегающего колеса первой колесной пары от времени для порожнего полувагона с базой 8,65 м (модель 12-726) в прямых участках пути при скорости движения 70 км/ч (рис. 1) и 90 км/ч (рис. 2).

Из графика на рис. 1 видно, что при движении порожнего полувагона по прямой некоторые значения коэффициента устойчивости уже при скорости 70 км/ч опускается ниже нормативного значения 1,3. С увеличением скорости до 90 км/ч количество зон возможного вкатывания возрастает (рис. 2).

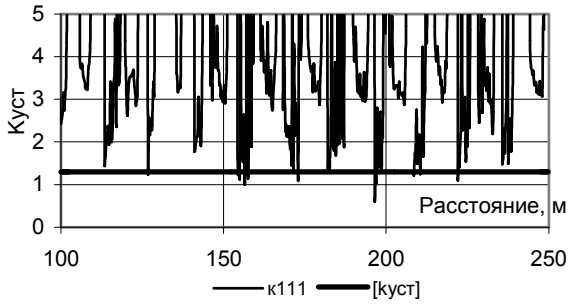


Рис. 1. Изменение коэффициента устойчивости набегающего колеса первой колесной пары порожнего полувагона с базой 8,65 м (модель 12-726) в прямых участках пути при скорости движения 70 км/ч.

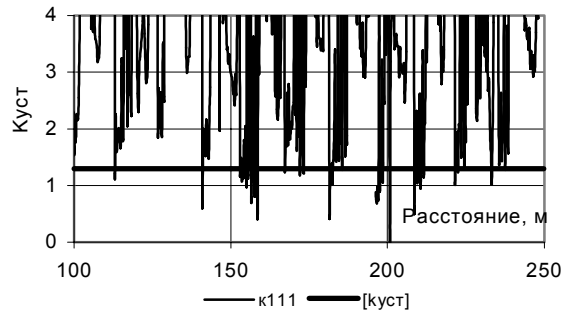


Рис. 2. Изменение коэффициента устойчивости набегающего колеса первой колесной пары порожнего полувагона с базой 8,65 м (модель 12-726) в прямых участках пути при скорости движения 90 км/ч

Были проанализированы зависимости коэффициента устойчивости от скорости движения для всех исследуемых экипажей. Графики зависимостей для полувагона с базой 8,65 м приведены на рис. 3 при движении в прямой, на рис. 4 – в кривой 600 м при возвышении наружного рельса 0, 60 и 150 мм, на рис. 5 – в кривой 300 м при возвышении наружного рельса 0, 95 и 150 мм.

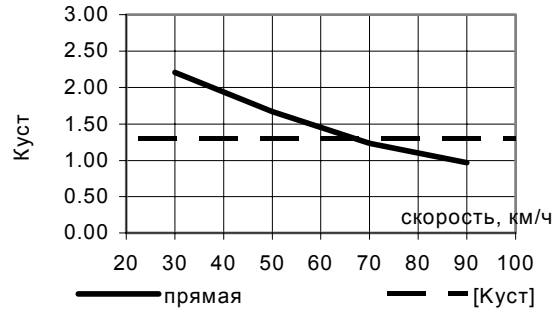


Рис. 3. Зависимость коэффициента устойчивости полувагона с базой 8,65 м (модель 12-726) от скорости в прямых участках пути

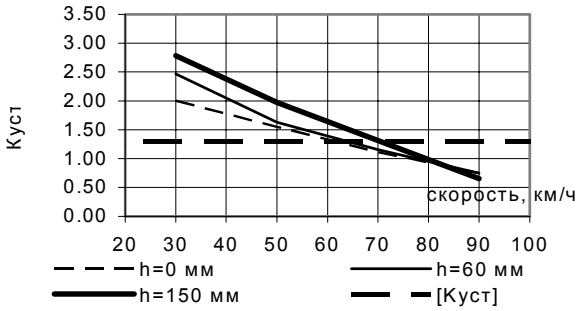


Рис. 4. Зависимость коэффициента устойчивости полувагона с базой 8,65 м (модель 12-726) от скорости в кривой радиусом 600 м

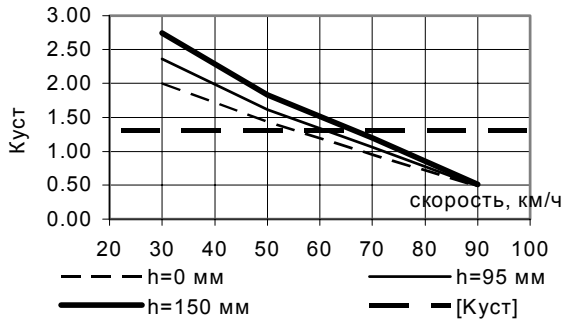


Рис. 5. Зависимость коэффициента устойчивости полувагона с базой 8,65 м (модель 12-726) от скорости в кривой радиусом 300 м

Анализ графиков (рис. 3–5) показывает, что у полувагона с базой 8,65 м ограничение скорости в прямой по коэффициенту устойчивости против вкатывания гребня колеса на рельс устанавливается при скорости 65…70 км/ч.

На рис. 6 приведен график для порожнего полувагона с длиной базы 15,69 м. Из графика видно, что при базе 15,69 м ограничение скорости из-за возможного вкатывания устанавливается при скорости 55 км/ч.

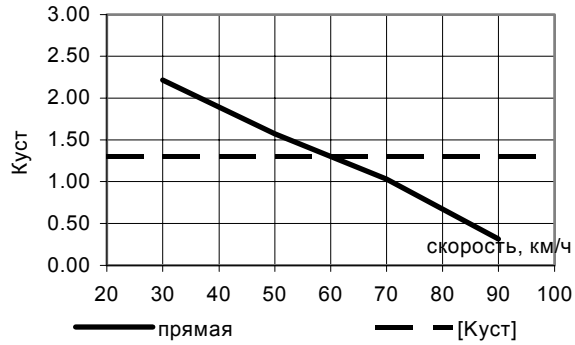


Рис. 6. Зависимость коэффициента устойчивости порожнего полувагона с базой 15,69 м (модель 12-4004) от скорости в прямых участках пути

Из рис. 7–9 видно, что для крытого вагона с базой 12,24 м в прямой вкатывание возможно при скорости выше 65 км/ч, для хоппера с базой 5,87 м и цистерны с базой 7,8 м – при скорости выше 60 км/ч. На графиках приведены также зависимости коэффициента устойчивости от скорости в кривых радиусом 600 м при возвышении наружного рельса 60 мм и радиусом 300 м при возвышении 95 мм.

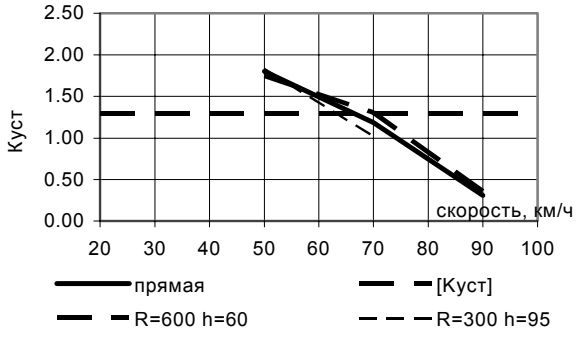


Рис. 7. Зависимость коэффициента устойчивости крытого вагона с базой 12,24 м (модель 11-280) в прямых участках пути и в кривых радиусом 600 и 300 м

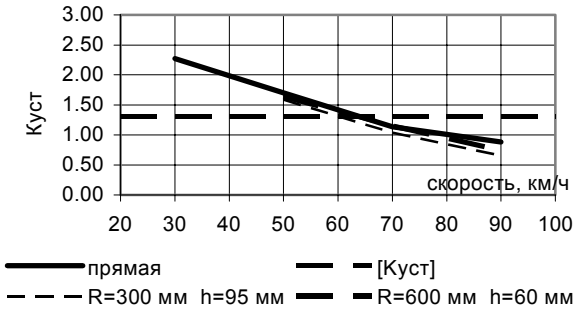


Рис. 8. Зависимость коэффициента устойчивости хоппера с базой 5,87 м (модель 20-480) в прямых участках пути и в кривых радиусом 600 и 300 м

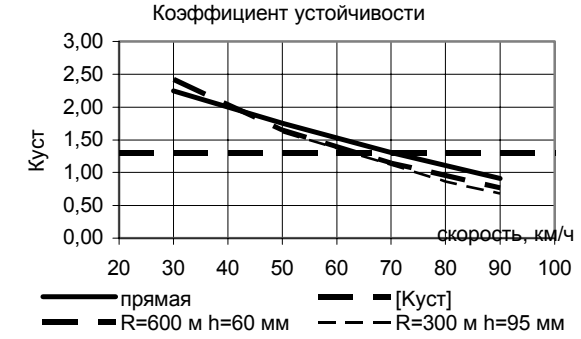


Рис. 9. Зависимость коэффициента устойчивости цистерны с базой 7,8 м (модель 150-1443) в прямых участках пути и в кривых радиусом 600 и 300 м

Допускаемые скорости движения груженых и порожних вагонов, полученные в результате математического моделирования, представлены в табл. 2 для прямых участков пути, в кривых радиусом 600 и 300 м.

Таблица 2

Допускаемые скорости движения порожних вагонов

Тип экипажа	Допускаемые скорости движения, км/ч, в участках пути				
	Прямая	Кривая 600 м с возвышением, мм		Кривая 300 м с возвышением, мм	
		0	60	0	95
Крытый вагон, модель 11-217	70	45	70	35	60
Крытый вагон, модель 11-280	65		70		60
Полувагон, модель 12-726	70		65		60
Полувагон, модель 12-4004	55		55		55
Цистерна, модель 15-1443	70		60		60
Цистерна, модель 15-884	70		70		60
Хоппер, модель 20-4015	75		70		60
Хоппер, модель 20-480	65		65		60

Согласно [2] даже, если значение коэффициента устойчивости против вкатывания колеса принимает значение ниже нормативного, это не означает, что сход колеса с рельса неизбежен. Для того, чтобы произошел сход время действия сил, при котором нарушено нормативное значение коэффициента устойчивости должно быть таким, чтобы колесо успело вкатиться гребнем на рельс.

При помощи модели были произведены расчеты, получены и проанализированы зависимости времени $t_{\text{возм. вк}}$, когда может произойти вкатывание гребня набегающего колеса на головку рельса, от скорости и типа экипажа. Под временем возможного вкатывания гребня колеса на рельс в данной статье подразумевается непрерывный интервал времени, в течение которого значение коэффициента устойчивости принимает значение ниже нормативного. На рис. 10–12 приведены фрагменты зависимости

коэффициента устойчивости от времени для хоппера с базой 5,87 м (рис. 10), для крытого вагона с базой 12,24 м и для цельнометаллического полувагона с базой 15,69 м при движении по прямому участку пути. Фрагменты показаны в тех местах, где значение коэффициента устойчивости опускается ниже нормативного значения на протяжении наибольшего промежутка времени. Здесь же стрелками указаны участки возможного вкатывания колеса на рельс $l_{\text{возм. вк}}$ на уровне, соответствующем нормативному значению коэффициента устойчивости.



Рис. 10. Зависимость коэффициента устойчивости хоппера с базой 5,87 м в прямых участках при движении со скоростью 90 км/ч

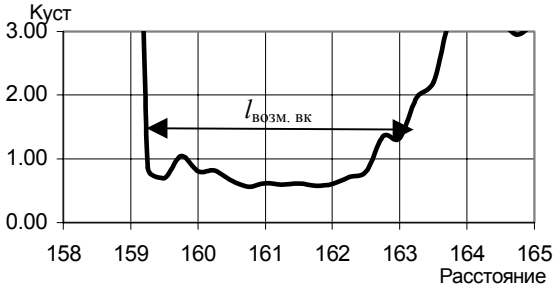


Рис. 11. Зависимость коэффициента устойчивости крытого вагона с базой 12,24 м в прямых участках при движении со скоростью 90 км/ч

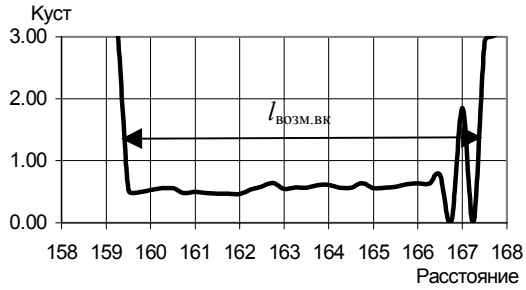


Рис. 12. Зависимость коэффициента устойчивости полувагона с базой 15,69 м в прямых участках при движении со скоростью 90 км/ч

Анализ графиков на рис. 10–12 показывает, что с увеличением длины базы возрастает время возможного вкатывания гребня колеса на головку рельса. Так, для хоппера этот промежуток равен 0,03 с, для крытого вагона – 0,16 с, для длиннобазного полувагона – 0,27 с.

Были сделаны расчеты и проведен анализ времени возможного вкатывания гребня колеса на головку рельса для всех исследуемых экипажей при скоростях движения 50, 70 и 90 км/ч. Из всех значений времени возможного вкатывания для каждого из экипажей были выбраны максимальные значения. Результаты представлены в виде гистограмм на рис. 13–15.

Из анализа гистограмм видно, что при увеличении скорости и длины базы экипажа возрастает и время возможного вкатывания гребня колеса на рельс. Так, при скорости 90 км/ч в прямом участке пути при увеличении базы от 5,87 м (хоппер) до 15,64 м (длиннобазный полувагон) время вкатывания возрастает от 0,03 до 0,27 с, т. е. почти в десять раз. Аналогичная ситуация наблюдается и при движении экипажей в кривых участках пути.

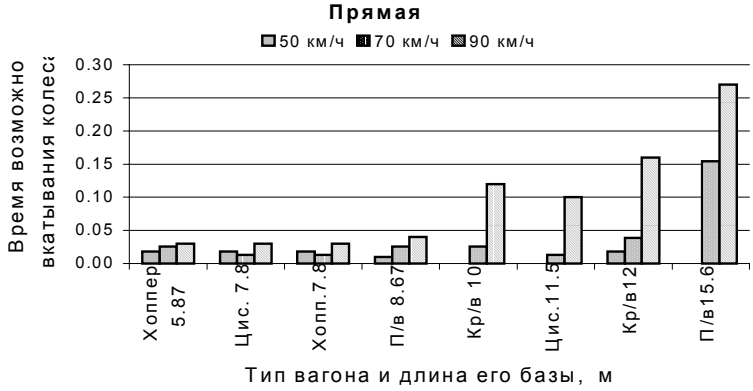


Рис.13. Время возможного вкатывания гребня колеса на головку рельса при движении экипажей по прямому участку пути

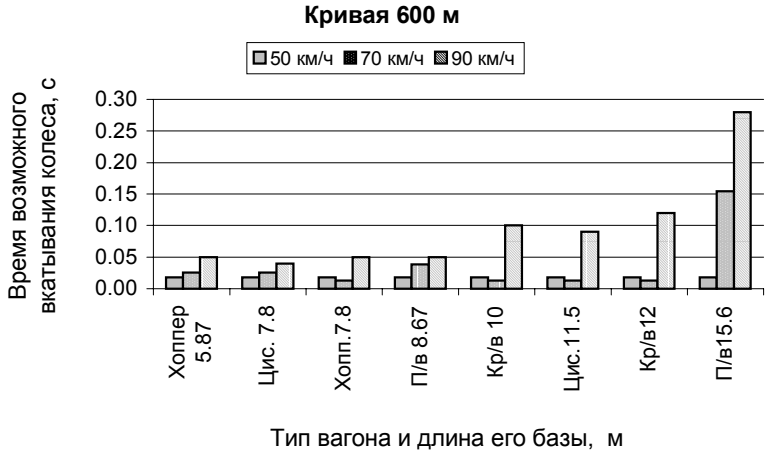


Рис.14. Время возможного вкатывания гребня колеса на головку рельса при движении экипажей в кривой радиусом 600 м

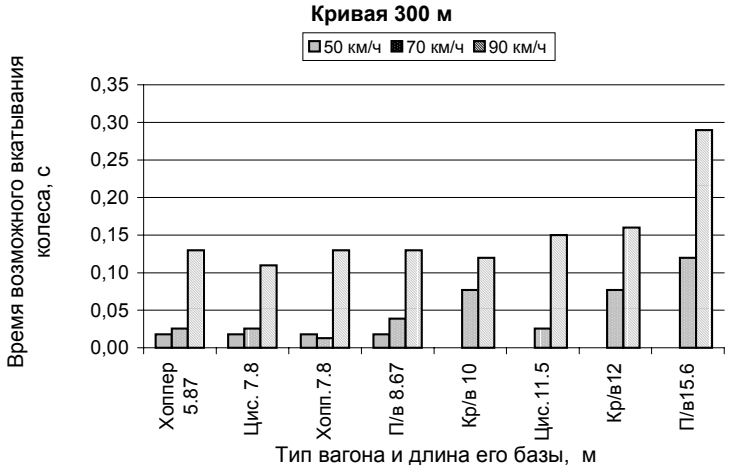


Рис.15. Время возможного вкатывания гребня колеса на головку рельса при движении экипажей в кривой радиусом 300 м

В течение времени возможного вкатывания гребень колеса не вкатывается на рельс, но колесо и не спускается обратно в колею, если по каким-то причинам началось всползание гребня. Сход происходит в течение 0,03…0,08 с [4] под воздействием рамных сил значительно больших, чем те, что встретились при проведении расчетов.

Выводы

1. Скорость движения порожних вагонов следует ограничить величиной 60…70 км/ч – в зависимости от типа вагона и характера участка пути, по которому осуществляется движение в соответствии с табл. 2. При больших скоростях значение коэффициента запаса устойчивости колеса против вкатывания на головку рельса оказывается меньше допускаемой величины.

2. С увеличением длины базы вагона и скорости движения растет продолжительность отрезка времени, в течение которого коэффициент запаса устойчивости колеса принимает значения ниже допустимых.

3. Наиболее перспективным направлением дальнейших исследований представляется изучение неровностей железнодорожного пути на участках разных классов и моделирование поведения вагона на этих неровностях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазарян В. А. Динамика вагонов. – М.: Транспорт, 1964. – 240 с.
2. Вершинский С. В. Данилов В. И., Хусидов В. Д. Динамика вагонов. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.
3. Данович В. Д., Рыбкин В. В., Мямлин С. В., Рейдемейстер А. Г., Трякин А. П., Халипова Н. В. Определение допускаемых скоростей движения грузовых вагонов по железнодорожным

путям колеи 1520 мм // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпроппетр. нац. ун-ту залізн. трансп. 2003. – Вип. 2. – С. 77–86.
4. Блохин Е. П., Пшинько А. Н., Коротенко М. Л., Рейдемейстер А. Г. О запасе устойчивости колеса против схода с рельса // Залізничний транспорт України, 2002. – № 2. – С. 22–24.
5. Отчет по НИР «Комплексные экспериментальные исследования динамическх процессов в длинносоставных поездах из порожних полувагонов и динамической нагруженности пути с целью разработки рекомендаций, направленных на обеспечение стабильности пути на участке Макушино–Петропавловск Южно–Уральской железной дороги». ДИИТ. 1992 г. УДК 625.151.21:629.4.116. – 197 с.
6. Звіт за НДР «Норми допустимих швидкостей руху локомотивів і вагонів по залізничних коліях України шириною 1520 мм». ДІІТ. 2002р. УДК 629.46.015/.016:625.03, № ДР 0102U003580, 330 с.
7. Данович В. Д. Пространственные колебания вагонов на инерционном основании: Дис. … д-ра техн. наук: – Д., 1982. – 465 с.
8. Рейдемейстер А. Г.: Дис. … канд. техн. наук: – Д., 2000. – 230 с.
9. Данович В. Д., Рейдемейстер А. Г., Халипова Н. В. Математическая модель взаимодействия пути и пассажирского вагона при движении по участкам произвольной кривизны // Транспорт: Зб. науч. пр. – Д.: Нова ідеологія, 2001. Вип. 8. – С. 124–138.
10. Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР. Альбом-справочник. – М.: Транспорт, 1989.
11. Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм. Альбом справочник 002И-97 ПКБ ЦВ. – М., ПКБ, 1998.
12. Цистерны. Устройство, эксплуатация, ремонт. Справочное пособие.– М.: Транспорт, 1990.
13. Пастухов И. Ф. и др. Вагоны. – М.: Транспорт, 1988.
14. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: Гос. НИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
15. О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм: утверждено приказом МПС России № 41 от о12.11.01.
16. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М. Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

Поступила в редколлегию 18.11.03.

УДК 624.21:625.1

В. І. БОРЩОВ (ДІІТ)

ДО ПИТАННЯ ПРО СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ШТУЧНИХ СПОРУД ЗАЛІЗНИЦІ

Розглянуті питання, які пов'язані із створенням автоматизованої системи експлуатації штучних споруд окремо взятої залізниці. Наводиться припустимий склад системи, розглянуті режими її роботи. Наведена укрупнена блок-схема системи експлуатації штучних споруд.

Рассмотрены вопросы, связанные с созданием автоматизированной системы эксплуатации искусственных сооружений отдельно взятой железной дороги. Описывается предполагаемый состав системы, рассмотрены режимы ее работы. Приведена укрупненная блок-схема системы эксплуатации сооружений.

The paper considers the issues, related to creation of automated maintenance system of artificial structures on a separately taken railway. A probable structure of the system is described, its operational modes are considered. The aggregative flow-chart of the structures' maintenance system has been provided.

Удосконалення виробництва, прискорення режимів роботи, підвищення вимог до якості не тільки продукції, але і до послуг примушують переглядати наші вимоги до систем управління. І вже для якісної й економічної роботи будь-якого виробництва або підприємства необхідно мати не тільки сучасну технологію, але і сучасну систему управління, яка безперервно удосконалюється.

Найбільш помітний переворот в управлінні відбувся з появою ЕОМ, які, у все більших масштабах, впроваджуються на підприємствах різних галузей. Створені на їхній базі автоматизовані системи управління ось уже більш 20 років непокоять виробничників: дотепер не вщухають суперечки щодо їх ефективності і престижності, їх переваг і недоліків, особливостей взаємодії в них людини і машини – партнерів з розв'язування задач управління.

У 1994 р. на замовлення Державної адміністрації залізничного транспорту України галузевою науково-дослідною лабораторією штучних споруд і галузевою науково-дослідною лабораторією динаміки і міцності рухомого складу Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна виконувалися роботи зі створення теоретичних основ комп'ютерної системи експлуатації штучних споруд на залізничному транспорті. У рамках цієї роботи був визначений перелік основних положень, що повинні були використовуватися у разі створення зазначеної системи.

З незалежних від виконавця причин, основною з яких була відсутність фінансування, роботи з створення системи експлуатації штучних споруд були припинені. Роботи були поновлені лише в 1997 р. і за відсутності фінансування розробки в необхідному обсязі, система була виконана лише у вигляді інформаційної і тільки для малих і середніх мостів.

У сучасних умовах при зростанні інтенсивності і швидкості руху поїздів, збільшенні навантаження на вісь розробка автоматизованої системи експлуатації штучних споруд окремо взятої залізниці з використанням сучасних ЕОМ є одним із найважливіших заходів щодо удосконалення роботи Управління залізниці, а саме відділу штучних споруд служби колії. Між тим, сьогодні відділи штучних споруд залізниць України не мають не тільки системи експлуатації штучних споруд, але й найпростішої інформаційної системи з штучних споруд їх мереж.

Впровадження такої системи дозволить підвищити безпеку руху поїздів і поліпшити експлуатаційні характеристики штучних споруд за рахунок автоматизованого контролю їхньої вантажопідйомності, своєчасних оглядів, ремонтів і реконструкції.

Велику допомогу надасть система у разі поточного планування робіт з штучних споруд. Це стандартна задача, що виникає щорічно під час формування річного плану відділу штучних споруд залізниці і дистанцій колії, потім при розподіленні річних планів на квартальні, а останніх – на щомісячні.

Впровадження системи експлуатації штучних споруд залізниці дозволить також оперативно керувати поточним утриманням та експлуатацією штучних споруд.

Слід також мати на увазі, що підрозділи Головного управління колійного господарства вирішують різні задачі під час експлуатації мостів. Найбільш повна інформація щодо штучних спо-

руд потрібна саме відділу інженерних споруд служби колії Управління залізниці.

Укрупнена блок-схема системи експлуатації штучних споруд окремо взятої залізниці наведена на рис. 1. Схема управління базами даних і схема захисту текстової інформації від несанкціонованого доступу до неї на блок-схемі системи не показана.

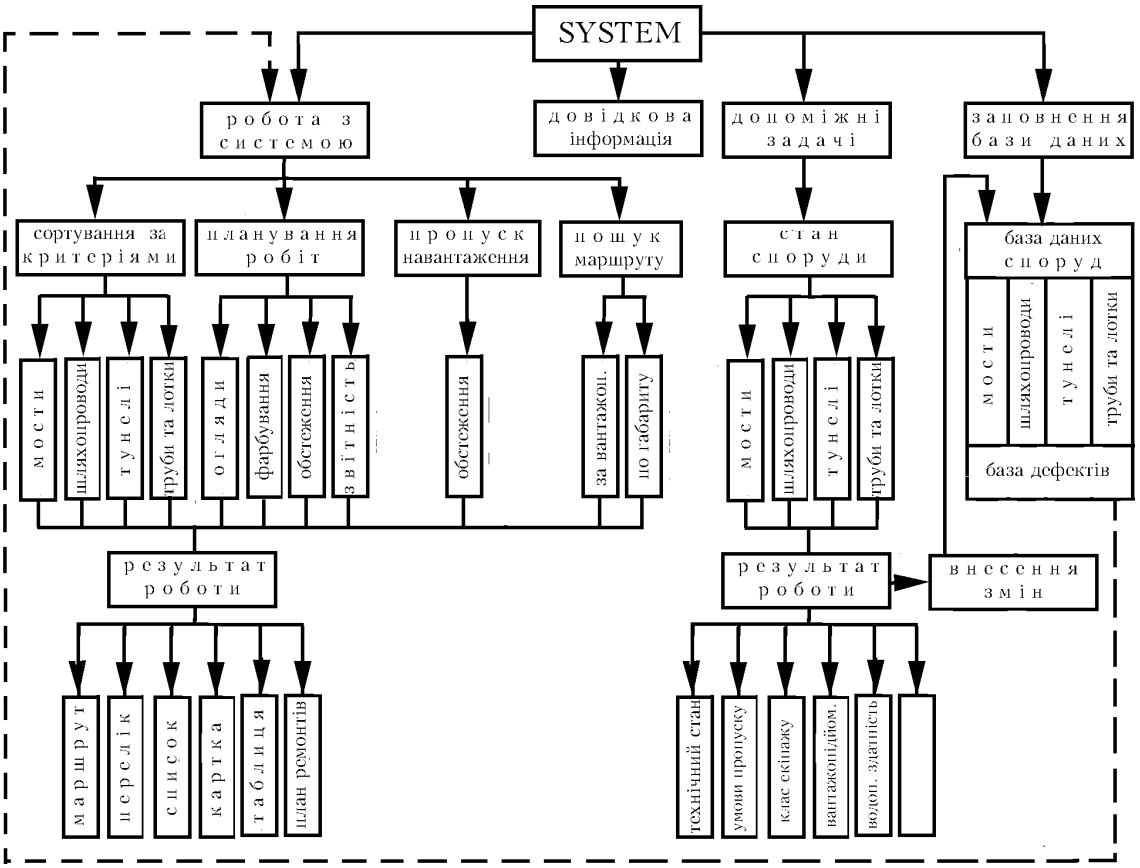


Рис. 1. Укрупнена блок-схема автоматизованої системи експлуатації штучних споруд

Одним із найважливіших блоків запропонованої системи експлуатації штучних споруд є база даних штучних споруд. База даних штучних споруд дозволить забезпечити процес накопичення і збереження такої інформації:

- нормативні дані з експлуатації штучних споруд;
- класифікаційні таблиці категорій штучних споруд за водопропускною здатністю;
- відомості про вантажопідйомність, провізну і пропускну спроможність ділянок залізниці;
- додаткові відомості про результати проведених оглядів, випробувань, ремонтних робот, реконструкції споруд;
- відомості про технічний стан споруд на даному етапі.

Автоматизована система експлуатації штучних споруд на залізничній мережі окремо взятої залізниці повинна створюватися на основі банку даних споруд і дозволяти видавати користувачу конкретні відомості щодо споруд у зручній формі у вигляді таблиць, переліків, списків, маршрутів руху негабаритних вантажів тощо.

Передбачається, що система експлуатації споруд на залізничній мережі в межах навіть однієї залізниці повинна вирішувати такі задачі:

- здійснювати пошук штучних споруд по заданих критеріях;
- виконувати інженерно-технічні розрахунки, пов’язані з визначенням умов подальшої експлуатації споруд;
- планувати огляди мостів і фарбування металевих прогінних будов;
- визначати оптимальний маршрут перевезення негабаритного вантажу;
- складати звітність по експлуатації споруд;
- оцінювати технічний стан штучних споруд;
- складати картку штучної споруди.

Документи, які використовуються в системі експлуатації штучних споруд

Основними документами для виконання даної роботи є розроблені раніше алгоритми і програми, картки штучних споруд, інженерно-технічні звіти про обстеження й випробування мостів, а також акти періодичних оглядів споруд.

Інформація про споруди повинна цілком відповідати нормативній документації з експлуатації штучних споруд на залізничній мережі України.

Класифікація залізобетонних прогінних будов за наявності на них арматурних і опалубних креслень провадиться відповідно до правил [1].

Згідно з положеннями цього документа визначається також вантажопідйомність плитних і ребристих прогінних будов з жорсткою арматурою, прогінних будов, що запроектовані за нормами 1907 р., а також на підставі порівняння розрахункових норм.

Вантажопідйомність металевих прогінних будов повинна виконуватися згідно з галузевим стандартом [2].

Визначення вантажопідйомності кам'яних і бетонних аркових мостів, а також опор мостів засобами запропонованої системи в зв'язку з відсутністю нормативних документів не передбачається.

Вихідними даними для визначення оптимального маршруту є назви пунктів відправлення і призначення негабаритного вантажу, а також його клас і габарит. У процесі оптимізації маршруту провадиться порівняння класу і габариту рухомого навантаження з класом і габаритом штучної споруди. У схемі з'єднань роздільних пунктів вилучаються ті з'єднання, на яких є штучні споруди, клас яких і габарит нижче класу рухомого навантаження. Після цього провадиться вибір маршруту прямування навантаження, для якого відстань між початковим і кінцевим пунктами найменша, і визначаються умови пропуску поїздів, розташованих на обраному маршруті.

Слід мати на увазі, що для рішення задачі з пошуку оптимального маршруту, треба мати відомості про бокові і висотні габарити будь-яких споруд, що експлуатуються також іншими організаціями, але знаходяться на маршруті руху навантаження.

Для визначення водопропускної здатності середніх і малих мостів, а також труб, немає відповідного нормативного документа, що регламентує методику проведення відповідних розрахунків. Такі розрахунки можуть бути виконані згідно з положеннями [3], які, на наш погляд, не викликають ніяких сумнівів у своїй достовірності.

У разі пошуку оптимального маршруту перевезення негабаритного вантажу великої ваги може виникати необхідність визначити клас рухомого навантаження.

Цей клас може визначатися з використанням програми « CERRIAGE», що була розроблена співробітниками галузевої науково-дослідної лабораторії штучних споруд Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Ця програма має у своєму складі базу екіпажів, що обертаються на залізничній мережі держав СНД і Балтії, і призначена не тільки для визначення класів будь-якого рухомого навантаження, але і для визначення умов його пропуску по мосту.

Одним із режимів роботи системи експлуатації штучних споруд окремо взятої залізниці є режим «електронної картотеки», що дозволяє організувати збереження, зміну, доповнення і видачу карток штучних споруд.

За відсутності вітчизняного нормативного документа, діагностику й оцінку технічного стану і якості поточного утримання штучних споруд передбачається визначати відповідно до положень [4].

Методи й алгоритми функціонування системи

До основних режимів роботи системи експлуатації штучних споруд відносяться:

- робота із системою;
- довідкова інформація;
- поповнення банку даних штучних споруд і внесення змін до нього;
- доповнення і внесення змін у банк дефектів штучних споруд;
- доповнення банку рухомого складу відомостями про нові екіпажі;
- рішення допоміжних задач.

Режим «довідкова інформація» дозволить одержати службову інформацію про прийоми роботи із системою.

Режим «поповнення банку даних» призначений для початкового заповнення банку даних штучних споруджень і подальшого його розширення.

Планується, що інформація, яка заноситься до бази даних штучних споруд, підрозділяється на декілька груп. До таких груп відносяться:

- місце розташування штучної споруди;
- загальні відомості про штучну споруду;

- відомості про конструкцію проїжджої частини безпосередньо на споруді;
- конструкція колії на підходах до штучної споруди;
- відомості, що характеризують прогінні будови мосту;
- опори мостів;
- відомості про вантажопідйомність мостів і шляхопроводів;
- характеристика регуляційних споруд;
- перелік найбільш суттєвих дефектів елементів штучної споруди;
- інші відомості.

У розділі бази даних «Місце розташування» указується назва організації, що експлуатує споруду, місце знаходження штучної споруди за кілометражем ділянки, тип і назва перешкоди, яка пересікається залізницею.

У «Загальних відомостях» може приводитися інформація з вантажонапруженості ділянки залізниці, розмір споруди, кількість і розмір розрахункових прогонів, повна довжина споруди, отвір мосту або труби, наявність комунікацій на споруді.

У розділі про проїжджу частину на мосту і підходах необхідно вказувати габарит проїжджої частини, тип мостового полотна, кількість мостових брусів або залізобетонних безбалластних плит БМП, тип рейок і контррейок або контркутиків. Необхідні також відомості про їх кількість та дату укладання в колію.

Одним із найважливіших розділів бази даних штучних споруджень є розділ «Прогінні будови». У цьому розділі для кожної прогінної будови повинні вказуватися її тип (із будівельної механіки), розмір розрахункового прогону, рівень їзди, матеріал прогінної будови, маса металевої або об'єм залізобетонної прогінної будови, розрахункові норми і розрахункове навантаження, рік спорудження і рік встановлення в міст, відомості про габаритні розміри прогінної будови, назва проектної організації, відомості про підсилення прогінної будови тощо.

Для кожної опори мосту наводяться: номер по кілометражу лінії; тип опори; рік будівництва; відомості про матеріал тіла опори та облицювання, підферменика і розчину кладки; тип фундаменту і глибина його закладання, об'єм кладки фундаменту і грунт основи.

У цьому ж розділі бази даних наводяться і відомості про цементацію кладки опори або влаштування залізобетонної сорочки.

У розділі «Регуляційні споруди» відзначається самий факт наявності або відсутності регуляційних споруд, описується їхня конструкція, наводяться відомості про наявність корчоходу або льодоходу, вказується тип укріплення русла і конусів та його об'єм.

Дефекти споруд повинні наводитися окремо для основних елементів споруд, тобто для підходів, проїжджої частини, прогінних будов мосту, в залежності від матеріалу з якого вони виконані, опорним частинам, опорам, підмостовому руслу і регуляційним спорудам.

Режим «внесення змін» забезпечує поточну модифікацію інформації зі штучних споруд, занесених у банк даних.

Режим «робота з системою» є основним режимом автоматизованої системи експлуатації штучних споруд залізниці і призначений для рішення таких задач:

- сортування даних по заданому критерію;
- планування робіт;
- умов пропуску різноманітних навантажень;
- пошук маршруту проходження спеціального навантаження із пункту A в пункт B з урахуванням його габариту і повної маси.

Режим «рішення допоміжних задач» передбачає рішення інженерно-технічних задач, пов'язаних з експлуатацією споруд. До таких задач можуть відноситися:

- визначення вантажопідіймальності прогінних будов залізобетонних і металевих мостів;
- категорій малих і середніх мостів за водопропускною здатністю;
- класифікація будь-яких рухомих навантажень;
- оцінка технічного стану споруд і якості їх поточного утримання.

Пошук і сортування інформації здійснюється за зазначеним користувачем системи переліком критеріїв і питань.

Під критерієм розуміється одна з загальних характеристик штучної споруди. Під питанням розуміється назва інформації або параметрів, на які повинні бути отримані відповіді.

Автоматизована система експлуатації штучних споруд у межах залізниці повинна містити набори можливих значень кожного критерію, який вибирається за допомогою відповідного меню.

Ті критерії, що не мають скінчених величин можливих значень, вибираються разом з умовою «більше», «менше» або «дорівнює».

Вся службова інформація бази даних підрозділяється на основну і додаткову. До основ-

ної інформації ставиться вся інформація, що утримується в картці споруди.

До додаткової інформації відноситься така:

- перелік всіх роздільних пунктів залізниці та роздільних пунктів інших залізниць, які знаходяться на межі з нею;
- перелік водотоків у межах залізниці;
- схема з'єднань роздільних пунктів між собою;
- перелік технічних умов на проектування штучних споруд;
- таблиця можливих дефектів штучних споруд;

Перелік задач, які розв'язуються в різних режимах роботи системи, наведені на укрупненій блок-схемі.

Пошук необхідної інформації в банку даних штучних споруд реалізований із забезпеченням максимально можливої швидкості його виконання. З цією метою інформація банку даних розбита на групи з урахуванням можливої частоти її використання. Кожному з можливих критеріїв присвоюється спеціальний двійковий код. Інформація про штучну споруду зберігається у вигляді інформаційного вектора.

Інформаційний вектор зображується упорядкованою послідовністю двійкових кодів і посилань на текстову інформацію.

Для виконання пошуку інформації з усіх споруд за один перегляд бази даних формується інформаційний вектор критеріїв пошуку (маска). Цей вектор являє собою набір кодів значень критеріїв у формі, аналогічної їхньому відображенню в базі даних.

Склад і функції інформаційної системи

Система експлуатації штучних споруд залізниці повинна виконувати такі функції:

- забезпечувати санкціонований доступ до інформації зі штучних споруд і мати відповідну систему захисту інформації;
- забезпечувати пошук і сортування інформації відповідно до заданих критеріїв;
- розширювати і змінювати інформацію банку даних;
- забезпечувати відображення вихідної інформації на моніторі в зручній для користувача формі і формувати відповідні документи для виводу на принтер.

Санкціонований доступ до різних видів інформації зі штучних споруд забезпечується шляхом застосування багатоступеневої системи паролів.

Захист текстової і графічної інформації здійснюється її кодуванням із застосуванням спеціальних методів.

Склад графічної інформації системи

Графічна інформація автоматизованої системи експлуатації штучних споруд:

- схема залізниці;
- схеми штучних споруд.

Схема залізниці, для якої розробляється система експлуатації штучних споруд, являє собою карту регіону з нанесеними на неї роздільними пунктами і призначена для вибору в діалоговому режимі маршруту проходження негабаритного вантажу.

Для відображення схеми штучної споруди в базі даних повинний бути передбачений спеціальний графічний редактор, що виконує вибір схеми прогінної будови, проміжної опори або стояна, труби, оголовка труби.

Передбачається такий порядок створення схеми споруди:

- задаються основні геометричні розміри моста;
- указується кількість прогінних будов;
- з бібліотеки редактора вибираються необхідні графічні зображення елементів споруд, із котрих і набирається його схема.

При реалізації системи попередньо повинні бути затверджені форми карток штучних споруд, придатних для машинного опрацювання і збереження в пам'яті ЕОМ.

Висновки

Для успішної роботи системи експлуатації штучних споруд необхідно щоб первісну інформацію заносили безпосередньо робітники дистанцій колій, що краще за всіх знають ситуацію на спорудах, які вони експлуатують, і можуть оперативно вносити будь-які зміни в систему. Ці зміни повинні оперативно по лініях зв'язку передаватися в головну ЕОМ, яка встановлена у відділі штучних споруд служби колії залізниці і використовується для управління утриманням штучних споруд.

На жаль, в умовах обмеженого фінансування зазначеного напрямку робіт виконавці стикаються з достатньо серйозними труднощами. Це обумовлено тим, що для створення системи експлуатації штучних споруд треба виконати великий обсяг робіт з створення баз даних штучних споруд, рухомого складу, дефектів штучних споруд.

Дуже велика складність, під час створення бази штучних споруд, полягає і в тому, інформація щодо великої кількості споруд носить конфіденційний характер. Це, в свою чергу, не дає можливості заносити її до загальної інформації, оскільки потрібні надійні системи захисту інформації.

У разі відсутності повної інформації по штучним спорудам неможливо у повній мірі використовувати можливості системи експлуатації штучних споруд. Без повної інформації неможливо ні планувати роботи по штучним спорудам, ні вести пошуки оптимальних маршрутів з негабаритними вантажами великої ваги. У такому разі система експлуатації споруд перетворюється лише в інформаційну систему з дуже малими можливостями.

Важливу роль відіграє і людський фактор, а саме той факт, що одні робітники не розуміють необхідності створення сучасних систем експлуатації споруд з використанням ПЕОМ і користуються методами роботи, які в передових підприємствах давно відійшли в минуле, а інші просто не зацікавлені у створенні таких систем.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила визначення вантажопідйомності балкових залізобетонних прогонових будов залізничних мостів / В. І. Борщов, К. І. Солдатов, В. П. Тарасенко та ін. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 404 с.
2. Галузевий стандарт ГСТУ з2.6.03.111-2002 Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів – К.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 387 с.
3. Бегам Л. Г., Волченков Г. Я. Водопропускная способность мостов и труб. – М.: Транспорт, 1973. – 191 с.
4. Положение по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Союза ССР. – М.: Транспорт, 1991. – 29 с.

Надійшла до редколегії 28. 01.04

УДК 624.21.014:625.1

В. І. БОРЩОВ, М. К. ЖУРБЕНКО, Б. Д. СУХОРУКОВ (ДІІТ)

ДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ ПРОГІННОЇ БУДОВИ ТИПУ $690/7К$

У роботі розглядаються результати динамічних випробувань прогінних будов розрахунковим прогоном 110 м, виготовлених за типовим проектом $690/7К$.

В работе рассматриваются результаты динамических испытаний пролетных строенийс расчетным пролетом 110 м, изготовленных по типовому проекту $690/7К$.

The article considers the results of dynamic tests of sectional structures, with 110m rated flight length, manufactured under standard project $690/7К$.

В умовах збільшення швидкостей руху поїздів по мостам вкрай необхідно прогнозувати поведінку екіпажів під час їх проходу по прогінних будовах, тобто необхідно розглядати просторові коливання єдиної системи «прогінна будова – поїзд».

При теоретичних дослідженнях неможливо розглядати сумісні просторові коливання прогінних будов і екіпажів, не маючи достовірних відомостей про горизонтальну та вертикальну жорсткість прогінних будов та їх динамічних характеристик у разі вільних коливань або коливань завантаженої прогінної будови.

На поведінку системи «міст-поїзд» великий вплив, крім динамічних характеристик прогінних будов, має і жорсткість колії на мосту.

З метою експериментального дослідження горизонтальної та вертикальної жорсткості колії на мосту, галузевою науково-дослідною лабораторією штучних споруд та галузевою науково-дослідною колієвипробувальною лабораторією ДІІТу були виконані спеціальні дослідження.

Для визначення динамічних характеристик металевих прогінних будов розрахунковим прогоном 110 м науково-дослідною лабораторією штучних споруд ДІІТу були проведені динамічні випробування з використанням тільки графікових вантажних і пасажирських поїздів. Прогінні будови мосту, виготовлені за типовим $690/7К$ проектом, і мають 10 панелей по 11 м при теоретичній висоті головних ферм 15 м.

Динамічні випробування прогінних будов проводилися з метою вияснення їх роботи під впливом рухомих навантажень, визначення резонансних режимів у системі «міст-поїзд» та розробці рекомендацій з безпечного пропуску навантажень, які обертаються на ділянці, в умовах інтенсивного руху поїздів.

У задачі динамічних випробувань входило:

- визначення частот, форм і декрементів вільних просторових коливань прогінної будови;
- визначення прискорень і амплітуд коливань окремих вузлів прогінної будови при вимушених просторових коливаннях системи «міст-поїзд»;
- виявлення можливих резонансних режимів під час руху навантаження по прогінних будов мосту;
- виявлення динамічних напруг в елементах головних ферм прогінних будов.

Для вирішення поставлених задач при випробуваннях вимірювалися:

- динамічні вертикальні прогини у вузлах Н6 і Н8 лівої і правої ферм прогінної будови;
- амплітуди і прискорення вертикальних вільних і вимушених коливань лівої і правої ферм в середині та чвертях прогону;
- амплітуди і прискорення горизонтальних вільних і вимушених коливань в рівні верхнього і нижнього поясів, в чверті і середині прогону, а також верхнього вузла портального розкосу;
- поздовжні прискорення нижнього опорного вузла головної ферми на її рухомому кінці;
- динамічні осьові напруги в елементах Н5-Н6, Н7-Н8, Н9-Н10, В5-Н6, Н6-В7, В7-Н8, Н8-В9 і В9-Н10 головних ферм.

Для визначення моментів входу і виходу навантаження на прогінну будову над опорними перерізами встановлювалися відмітчики осей поїзда.

Схема розміщення основних приладів на прогінній будові наведена на рис. 1 і 2.

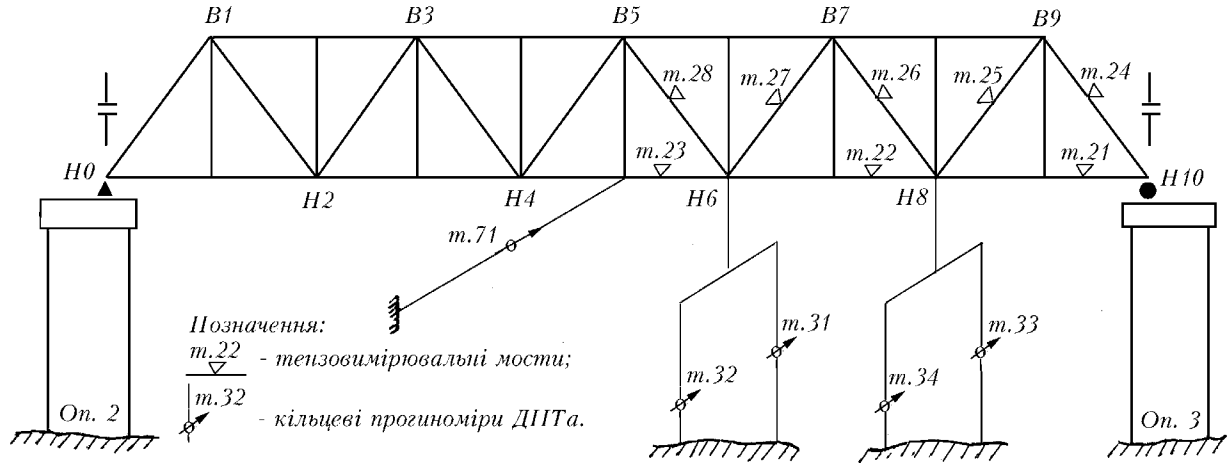


Рис. 1. Схема розміщення тензометричних мостів та кільцевих прогиномірів

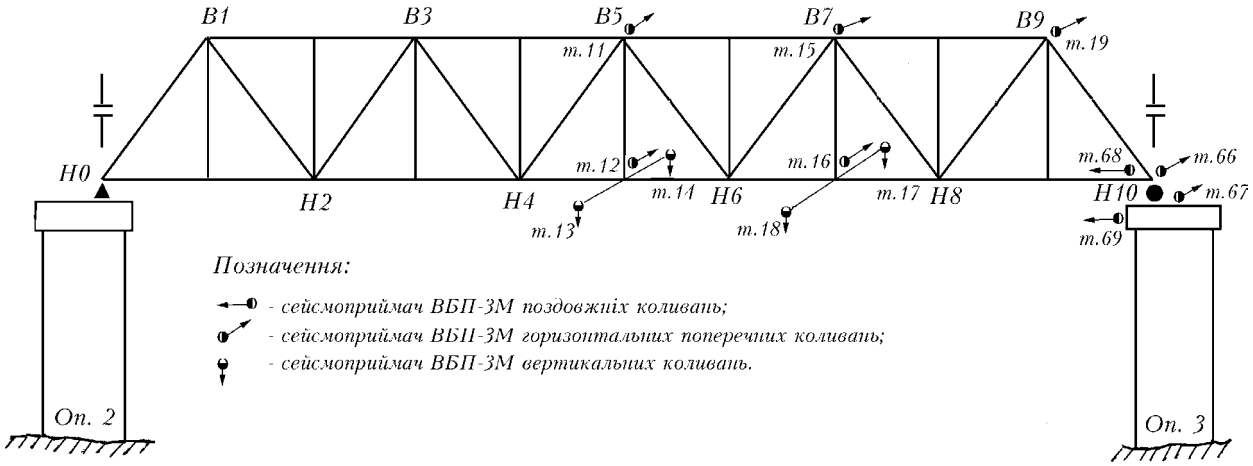


Рис. 2. Схема розміщення сейсмоприймачів

Динамічні напруження в елементах прогінної будови визначалися шляхом вимірювань фіброві деформацій за допомогою тензорезисторів марки 2ПКБ-20х200.

Для визначення амплітуд і частот просторових коливань прогінних будов використовувалися сейсмоприймачі ВБП-3М. Вимірювання прискорень різних елементів прогінних будов здійснювалося за допомогою вібровимірювальної апаратури з датчиками прискорень ДУ-5С-50.

Для визначення моментів проходу рухомого навантаження через прогінну будову використовувалися магнітні педалі ПМ-56, які встановлювалися біля голівки рейки в опорних перерізах прогінної будови 2–3.

Під час випробувань були зареєстровані динамічні процеси для 296 поїздів, які рухалися по мосту із швидкостями від 30…95 км/год. Особлива увага приділялася реєстрації динамічних процесів під час проходу по мосту однорідних екіпажів, а саме – порожніх піввагонів для перевезення сипучих вантажів, хоперів для перевезення міндобрив, цементу, зерна, дозаторів для перевезення баласту та цистерн для перевезення нафтопродуктів.

Динамічні характеристики руслових прогінних будов, а саме періоди, частоти, форми і декременти коливань визначалися шляхом обробки записів реалізацій динамічних процесів в системі «міст-поїзд». При обробці записів реалізацій динамічних процесів було помічено, що вони являють собою накладені одне на одне коливання з різними частотами і перешкоди у вигляді шуму. У зв’язку з цим реалізації динамічних процесів під час руху навантаження по мосту розглядалися як випадкові процеси, які мають гармонічні складові із випадковими амплітудами і фазами. Вважалося, що ці динамічні процеси стаціонарні у смислі Хінчина [2].

З метою визначення частотної структури процесів, які протікають в різних перерізах прогінної будови під час її просторових коливань, проводився спектральний аналіз реалізацій динамічних процесів, які були зафіксовані за допомогою сейсмоприймачів, кільцевих прогиномірів і тензорезисторів. Дискретизація реа-

лізацій динамічних процесів здійснювалась за допомогою дешифратора графіків з кроком квантування 0,02…0,05 с. Для чисельної оцінки спектральної густоти застосовувалося швидке перетворення Фурье.

Частоти вільних коливань

Як показав аналіз реалізацій вільних коливань три найнижчі головні форми вільних коливань прогонової будови мають частоти 0,95, 2,02 і 2,35 Гц.

Це наочно видно по піках на графіках частотного складу вільних коливань (рис. 3).

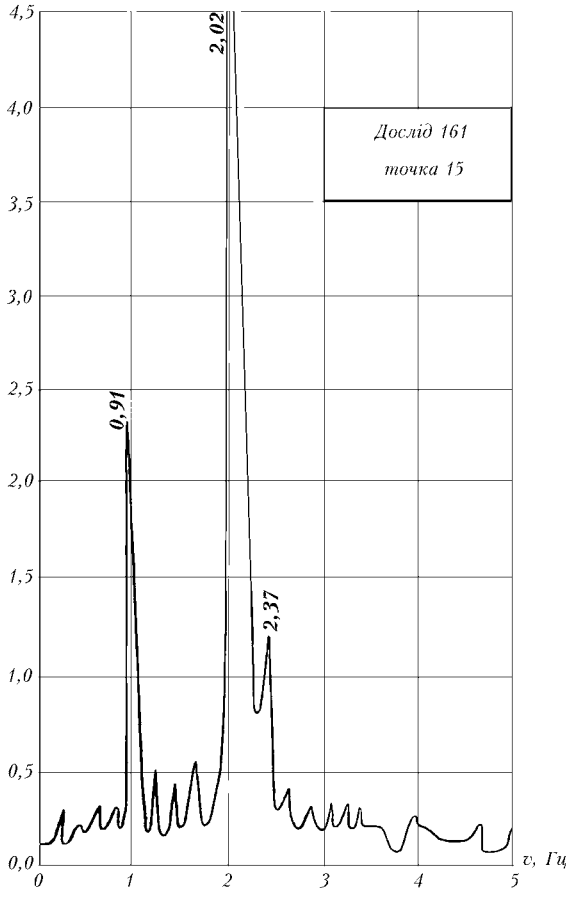


Рис. 3. Частотний склад коливань

Першою формою коливань поперечного перерізу прогінної будови при вільних просторових коливаннях (частота 0,95 Гц) є горизонтальні синфазні коливання поясів прогінної будови. Під час коливань за цією формою нижня і верхня вітрові ферми переміщуються в один і той же бік. Повороти контурів поперечних перерізів у цьому випадку незначні. Іншими словами, першою формою вільних просторових коливань прогінних будов типу $690/7К$ з розрахунковим прогоном 110 м є горизонтальні поперечні коливання з невеликим закручуванням контура. Період коливань за цією формою становить $T = 1,05$ с.

Друга форма вільних просторових коливань прогінної будови (частота 2,02 Гц) являє собою антифазні горизонтальні поперечні коливання поясів прогінної будови.

У цьому випадку верхня і нижня вітрові ферми переміщуються в різні боки і відбувається поворот всього поперечного перерізу прогінної будови. Частоті вільних коливань 2,02 Гц відповідають крутильні коливання типу «бокової качки», які супроводжуються значними горизонтальними переміщеннями поясів головних ферм. Період вільних коливань прогінних будов при другій формі дорівнює $T = 0,495$ с. Саме ця форма вільних просторових коливань домінує в переважній більшості випадків і особливо сильно проявляється після проходу з великою швидкістю порожнякових составів.

Третя форма коливань (частота 2,35 Гц) являє собою синфазні коливання головних ферм прогінної будови. Під час коливань прогінної будови за цією формою обидві його головні ферми переміщуються в одному напрямку у вертикальній площині. Закручування контуру поперечних перерізів прогінної будови практично не відбувається. Таким чином, третя форма просторових коливань є чисто вертикальними коливаннями Період вільних просторових коливань для цієї форми дорівнює $T = 0,426$ с.

Інші більш високі форми вільних просторових коливань під час випробувань майже не проявилися.

Для порівняння експериментальні та розрахункові значення частот вільних коливань зведені в табл. 1.

У табл. 1 наведені значення частот, які були підраховані за різними методиками. Досить хороший збіг розрахункових і експериментальних значень періодів і частот горизонтальних і вертикальних вільних просторових коливань прогінної будови. Гірше відповідають експериментальним значенням частоти і періоди крутильних коливань, що були підраховані з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). У цьому випадку розходження становить 16 % і очевидно, вплив того, що вся маса прогінної будови в розрахунку розподілялася по вузлах головних ферм, що призводить до завищеного значення моменту інерції обертання і як наслідок – до більш низького значення крутильної частоти.

Таблиця 1

Частоти і періоди вільних просторових коливань

Форма	Наближені формули		Теорія ДІТу		Метод МСЕ		Експеримент	
	ν, Гц	T, c	ν, Гц	T, c	ν, Гц	T, c	ν, Гц	T, c
1	0,90	1,106	1,00	1,000	1,07	0,934	0,95	1,050
2	2,01	0,498	1,71	0,584	1,69	0,592	2,02	0,495
3	–	–	–	–	2,42	0,413	–	–
4	2,34	0,427	2,34	0,427	2,44	0,410	2,35	0,426
5					3,04	0,329	–	–
6					3,77	0,265	–	–

Експериментальні значення частот і періодів вільних просторових коливань прогінних будов мосту відповідають не тільки розрахунковим даним, але і даним, що наведені у [1] для прогінних будов іншого типу з прогоном такої ж довжини.

Логарифмічні декременти коливань і коефіцієнти затухання

На реалізаціях динамічних процесів видно, що затухання вільних коливань прогінних будов по кожній із головних особистих форм відбувається по-різному.

Так, швидше за інші затухають вертикальні коливання, потім горизонтальні і в останню чергу – крутильні. Відомо, що характеристиками затухання коливань є логарифмічний декремент δ і коефіцієнт затухання ε. Їхні експериментальні значення були отримані по хвостових ділянках записів коливань для кожної із трьох основних форм коливань (табл. 2).

Таблиця 2

Характеристики затухання коливань

Характеристика	Вид вільних коливань		
	горизонтальні	крутильні	вертикальні
Декремент коливань	0,107 (0,120)	0,019 (0,021)	0,113 (0,07…0,14)
Коефіцієнт затухання	0,102 (0,07…0,107)	0,038 (0,049)	0,265 (0,20…0,35)

У табл. 2 у дужках наведені експериментальні значення логарифмічних декрементів і коефіцієнтів коливань, що були отримані для прогінних будов довжиною 110 м, але інших типів. Порівняння показує, що характеристика затухання прогінних будов типу $690/7K$ практично нічим не відрізняються від характеристик затухання прогінних будов іншого типу з розрахунковим прогоном 110 м.

Вимушені коливання

Частотний склад вимушених просторових коливань системи «міст-поїзд» значно різноманітніший за частотний склад вільних просторових коливань. Спектральний і гармонічний аналіз численних реалізацій вимушених коливань показав що частоти, які з'являються в системі, багато в чому залежать від характеру і виду поїзного навантаження та швидкості його руху. Як приклад на рис. 2 наведені графіки частотного складу реалізацій горизонтальних поперечних коливань середніх вузлів В5, Н5 прогінної будови 2–3 мосту і вертикальних коливань вузла Н5 під час руху по мосту поїзда із порожніх піввагонів із швидкістю 76,8 км/год, а також завантаженого нафтоналивного поїзда під час його руху із швидкістю 78,4 км/год.

На графіках видно, що під час руху поїзда із порожніх піввагонів домінуючою частотою вимушених коливань є частота 1,91 Гц. Ця частота проявляється у вигляді піка на амплітудно-частотних характеристиках як вертикальних, так і горизонтальних коливань різних вузлів прогінної будови. Вимушені коливання системи «міст-поїзд» носять резонансний характер, який супроводжується значним зростанням амплітуд коливань поясів головних ферм і кутів повороту поперечних перерізів прогінної будови. Це явище спостерігається під час руху по мосту составів із порожніх піввагонів із швидкістю 70,0…80,0 км/год. Форма вимуше-

них коливань прогінної будови з частотою 1,9 Гц аналогічна другій власній формі просторових коливань незавантаженої прогінної будови.

Серед різноманітності частотного спектру вимушених коливань системи «міст-поїзд» необхідно також відмітити частоти в діапазонах 0,65…0,80 і 1,7…2,2 Гц, що відповідають горизонтальній і вертикальній власним формам коливань завантаженої прогінної будови. Значення цих частот коливань змінюється залежно від маси поїзда, що рухається по мосту. Із збільшенням маси поїзда частота коливань системи зменшується.

Амплітуди просторових коливань

Амплітуди вимушених просторових коливань вузлів головних ферм суттєво залежать від виду поїзного навантаження і швидкості його руху як кількісна міра динамічних деформацій прогінної будови. У свою чергу великі амплітуди коливань можуть негативно впливати на безпеку руху составів і утруднювати нормальну експлуатацію споруди. Тому виясненню характеру зміни значень амплітуд вимушених коливань вузлів прогінної будови, залежно від швидкості руху і виду поїздів, приділяється велика увага.

Експериментальні значення амплітуд коливань вузлів головних ферм прогінної будови у вертикальному і поперечному горизонтальному напрямках визначалися по реалізаціях, які були отримані за допомогою сейсмоприймачів ВБП-3М і кільцевих прогиномірів ДІТу [1].

Для визначення вірогідних значень амплітуд коливань обробка експериментальних даних виконана методами математичної статистики [2–4] для двох великих груп поїздів залежно від їх виду. До першої групи віднесені состави, які складалися із порожніх чотиривісних піввагонів, а до другої групи – збірні та пасажирські поїзди. У кожній групі експериментальні дані збиралися в розряди за інтервалами швидкостей руху і зводилися в таблиці розподілення.

Для кожного розряду находилися характеристики розподілення амплітуд коливань, як випадкових величин, і визначалися параметри розподілення відповідно до [2; 3].

Значення верхніх довірчих границь для амплітуд поперечних горизонтальних і вертикальних коливань вузлів головних ферм прогінної будови, що були визначені шляхом статистичної обробки експериментальних даних з вірогідностями P(0,95), P(0,99) і P(0,999), наведені в табл. 4 і 5.

Таблиця 3

Вірогідні значення амплітуд коливань прогінної будови під час проходу поїздів із порожніх піввагонів

Вірогідність	Вузли прогінної будови						
	Горизонтальні коливання					Вертикальні	
	В5	Н5	В7	Н7	В9	Н5	Н7
P(0,95)	13,80	10,69	18,45	11,56	17,03	4,36	2,82
P(0,999)	16,21	12,40	21,11	13,38	19,77	5,09	3,29
P(0,999)	19,00	14,50	24,21	15,52	22,89	5,97	3,85

Таблиця 4

Вірогідні значення амплітуд коливань прогінної будови під час проходу збірних поїздів

Вірогідність	Вузли прогінної будови						
	Горизонтальні коливання					Вертикальні	
	В5	Н5	В7	Н7	В9	Н5	Н7
P(0,95)	11,60	9,83	16,38	9,96	15,21	7,33	4,88
P(0,999)	13,50	11,03	18,61	11,15	16,96	8,79	5,73
P(0,999)	15,90	12,40	20,85	12,54	19,13	10,45	6,75

Під час руху поїзди із порожніх піввагонів викликають амплітуди поперечних горизонтальних коливань вузлів прогінної будови в 2–3 рази більші, ніж збірні вантажні та пасажирські поїзди. Для зручності порівняння величини і характеру зміни амплітуд коливань

залежно від швидкості руху поїздів на рис. 4 наведені суміщені графіки зміни математичних сподівань і верхні довірчі границі амплітуд горизонтальних коливань середини прогінної будови у вузлах В5 і Н5, а вертикальних коливань у вузлі Н5 – на рис. 5.

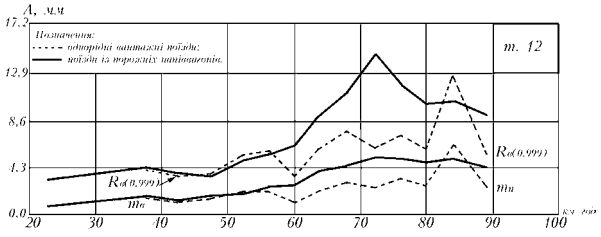


Рис. 4. Довірчі границі амплітуд горизонтальних коливань прогінної будови

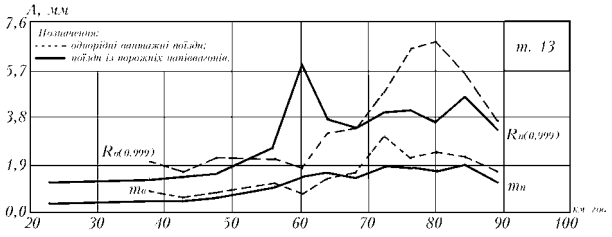


Рис. 5. Довірчі границі амплітуд вертикальних коливань прогінної будови

Слід відмітити той факт, що експериментальні значення амплітуд поперечних горизонтальних коливань прогінних будов іншого типу не перевищували 8 мм [1]. У нашому випадку маємо значення амплітуд поперечних горизонтальних вдвічі більше, що може призвести до несприятливого впливу на стійкість руху поїзного навантаження, а саме составів із порожніх піввагонів під час їх руху із швидкістю в межах 70…80 км/год.

На рис. 4 видно, що однорідні поїзди із порожніх піввагонів викликають максимальні амплітуди поперечних горизонтальних коливань під час руху із швидкістю 75 км/год, в той час як збірні вантажні і пасажирські поїзди значно менше розгойдують прогінну будову поперечному напрямку. Під час руху цих поїздів максимальне значення амплітуд коливань як у горизонтальній, так і вертикальній площині спостерігається при швидкостях 80,0…85,0 км/год. Однак і в цьому разі величина амплітуд коливань менша, ніж під час руху поїздів із порожніх піввагонів.

Динамічні напруження в елементах головних ферм

Програмою випробувань передбачалося визначення динамічних напруженостей в елементах нижнього поясу і розкосах прогінної будови.

Такі напруження були зареєстровані і оброблені для більшості дослідів. Найбільший інтерес становлять напруження, які виникають в елементах прогінної будови під час проходу по мосту важких екіпажів, а саме у разі пропуску по мосту нафтоналивних поїздів (табл.5).

Таблиця 5

Значення напружень в елементах головних ферм прогінної будови, МПа

Тип навантаження Швидкість руху, км/год	Елементи прогінної будови	Параметри					
		$\sigma_{ст}$	$\Delta\sigma$	σ_{max}	$\sigma_{р}$	σ_{Σ}	$\sigma_{теор}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Нафтоналивний поїзд із чотиривісних цистерн 75,3	Н10-Н8	20,96	1,87	22,83	35,07	57,90	122,44
	Н8-Н6	36,91	3,95	40,86	50,21	91,07	175,29
	Н6-Н4	66,82	8,48	75,30	54,13	129,43	188,97
	Н10-В9	84,74	6,05	90,79	34,33	125,12	119,84
	В9-Н8	59,02	4,54	63,56	48,55	112,21	169,48
	Н8-В7	69,26	8,91	78,17	29,42	107,59	102,69
	В7-Н6	30,31	3,12	33,43	31,97	65,40	111,60
	Н6-В5	24,52	4,64	29,16	10,66	39,82	37,20

Закінчення табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
Поїзд із чотиривісних порожніх піввагонів 78,2	Н10-Н8	5,24	3,14	8,38	35,07	43,45	122,44
	Н8-Н6	9,48	3,95	13,43	50,21	63,64	175,29
	Н6-Н4	16,97	7,42	24,39	54,13	78,52	188,97
	Н10-В9	21,94	11,35	33,25	34,23	67,58	119,84
	В9-Н8	14,38	6,81	21,19	48,55	69,74	169,48
	Н8-В7	17,83	10,97	28,80	29,42	58,22	102,69
	В7-Н6	6,02	5,57	11,59	31,97	43,56	111,60
	Н6-В5	9,94	9,94	19,88	10,66	30,50	37,20

У табл. 5 прийняті такі позначення: $\sigma_{ст}$ – напруження в елементі прогінної будови від статичної дії тимчасового навантаження; $\Delta\sigma$ – динамічна добавка в елементі прогінної будови від динамічної дії тимчасового навантаження; σ_{max} – максимальна величина динамічного напруження в елементі прогінної будови; $\sigma_{р}$ – напруження в елементі головної ферми від власної ваги прогінної будови; σ_{Σ} – сумарне напруження в елементі головної ферми від власної ваги прогінної будови і тимчасового навантаження; $\sigma_{меор}$ – напруження в елементі головної ферми від власної ваги споруди і нормативного тимчасового навантаження.

Як видно із табл. 4 динамічні складові $\Delta\sigma$ до напружень під час руху по мосту порожніх піввагонів практично для всіх елементів головної ферми мають більшу величину, ніж під час руху більш важкого нафтоналивного поїзда.

Між тим, максимальне напруження в елементах прогінної будови від дії нафтоналивного поїзда у 2…4 рази більше, ніж для поїзда із порожніх піввагонів, а сумарне напруження від власної ваги прогінної будови і тимчасового навантаження менше, ніж розрахункове. Виняток становить тільки лише для сходних розкосів Н10-В9, Н8-В7 і Н6-В5, для яких у разі руху по мосту нафтоналивних поїздів сумарне напруження від власної ваги конструкцій і тимчасового навантаження трохи вище за напруження від власної ваги конструкції і тимчасового нормативного навантаження. І все ж, для цих розкосів сумарне напруження менше за напруження від розрахункової власної ваги і тимчасового розрахункового навантаження для сталі 15ХСНД.

Оскільки поїзди із порожніх піввагонів під час руху по мосту викликають в системі «прогінна будова – поїзд» коливання резонансного характеру, виникло питання про оцінку впливу таких коливань на міцність від утомленості елементів головних ферм.

Відомо [7], що в розрахунках вплив циклічної дії навантаження враховується введенням до розрахункового опору основного метала знижуючого коефіцієнта зменшення γ розрахункового опору основного металу елементів, який залежить від характеристики циклу змінних напружень $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max}$.

У результаті обробки ряду дослідів, у яких спостерігалися коливання резонансного характеру, визначені величини σ_{min} і σ_{max}, а за ними – значення коефіцієнтів γ і ρ.

Результати обробки дослідів наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Оцінка міцності від утомленості елементів головних ферм

Елемент	σ_{min}, МПа	σ_{max}, МПа	ρ	γ	Елемент	σ_{min}, МПа	σ_{max}, МПа	ρ	γ
Н10-Н8	40,77	47,25	0,862	1,0	В9-Н8	59,48	67,79	0,877	1,0
Н8-Н6	58,64	65,11	0,900	1,0	Н8-В7	37,02	43,10	0,858	1,0
Н6-Н4	61,67	67,09	0,922	1,0	В7-Н6	39,91	48,08	0,830	1,0
Н10-В9	43,28	50,64	0,854	1,0	Н6-В5	14,70	22,26	0,660	1,0

Із табл. 6 видно, що коефіцієнт зменшення розрахункового опору основного металу елементів у всіх випадках дорівнює одиниці, тобто такі коливання на утомленість суттєво не впливають.

Динамічні прогини

Реєстрація динамічних прогинів головних ферм проводилася з метою визначення загальної фактичної деформативності прогінної будови під час руху по ній графікових поїздів.

Найбільший прогин 53,5 мм був зареєстрований в середині прогінної будови під час руху по мосту нафтоналивного поїзда із завантажених цистерн із швидкістю 75,3 км/год. Цей прогин становить всього $1/2047$ розрахункового прогону, що набагато менше за гранично допустиму величину для нашого випадку 162 мм або $1/675$ розрахункового прогону [7].

Під час руху по мосту поїзда із порожніх чотиривісних піввагонів із швидкістю 78,2 км/год прогин головних ферм прогінної будови не перевищував 15,5 мм.

Висновки

1. Динамічні характеристики прогінних будов, виготовлених за типовими проектами 690/7 і $690/7К$, не відрізняються від динамічних характеристик аналогічних прогінних будов більш ранніх норм проектування.

2. Особливістю даного типу прогінних будов є той факт, що під час руху поїздів із порожніх піввагонів амплітуди горизонтальних поперечних коливань прогінних будов значно зростають у порівнянні із аналогічними інших норм проектування.

Резонансні швидкості зменшуються із 85 до 75 км/год і при цьому спостерігаються крутильні коливання. Ця обставина суттєво не впливає на міцність і стійкість споруди, однак, призводить до розлаштувань в експлуатаційних улаштуваннях і викликає побоювання стосовно забезпечення стійкості коліс порожніх піввагонів проти сходу.

3. Для забезпечення безпеки руху поїздів і достовірної оцінки стійкості піввагонів проти сходу необхідні спеціальні випробування системи «міст-поїзд» з реєстрацією не тільки поведінки прогінної будови під час руху поїзда по мосту, але і одночасною реєстрацією поведінки вагонів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бондарь и др. Динамика железнодорожных мостов. – М.: Транспорт, 1965.
2. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – М.: Наука, 1971.
3. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1970.
4. Румшисский Л. З. Элементы теории вероятностей. –М.: Наука, 1970.
5. СНиП 2.05.03.84. Мосты и трубы. Госстрой СССР. – М., 1985.

Надійшла до редколегії 10.04.03.

УДК 666.970

В. Г. ВИКТОРОВ, Е. А. ДАНИЛОВ, Т. П. РЕШЕТНЯК (ДИИТ)

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ МАТЕРИАЛОВ СТАРОГО И НОВОГО БЕТОНА

У даній роботі виконана оцінка факторів, які впливають на спільну роботу старого та нового бетону, а також зроблена спроба огляду та вибору інструментів кінцево-елементного аналізу, за допомогою яких можна адекватно моделювати сумісну роботу багатошарових бетонних конструкцій.

В данной работе выполнена оценка факторов, влияющих на совместную работу старого и нового бетона, а также произведёна попытка обзора и выбора инструментов конечно-элементного анализа, с помощью которых можно адекватно моделировать совместную работу многослойных бетонных конструкций.

An estimation of factors, influencing structural compatibility of old and new concretes, has been performed by authors of the paper. They have also attempted to make a review and select the instruments of finite element analysis, with the help of which it is possible to model the combined work of multi-layer concrete designs.

При проведении ремонтных работ по восстановлению железобетонных конструкций технические требования к ремонтным составам определяются целым рядом факторов, а именно: адгезионной и химической совместимостью материалов, совместимостью по коэффициенту линейного расширения, технологией ремонта, стоимостью материала и т. д. [1; 2]. Очень часто совместная работа материалов старого и нового бетона не рассматривается вообще [3]. Под совместной работой подразумевается совместимость материалов по такому параметру как прочность.

Для проведения исследований была разработана математическая модель. Расчетная схема испытания лабораторного образца для исследования совместной работы материалов старого и нового бетона представлена на рис. 1.

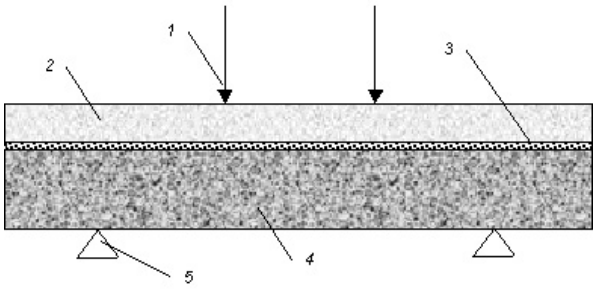


Рис. 1. Расчетная схема испытания лабораторного образца:
1 – нагрузка; *2* – новый бетон; *3* – контактный слой;
4 – старый бетон; *5* – условие опирания

Геометрическая и конечно-элементная модели исследуемого образца разработаны в препроцессоре конечно-элементной программы. На рис. 2 представлена конечно-элементная модель двухслойного образца.

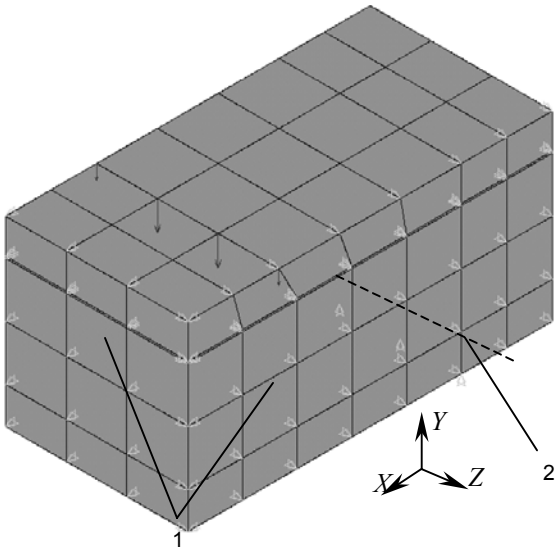


Рис. 2. Конечно-элементная модель с нагрузками и граничными условиями:
1 – симметричные граничные условия; *2* – условие опирания

Граничные условия приняты в виде запрещения по линии (показана пунктиром) перемещений по оси Y и условия симметрии по осям X и Z соответственно, как показано на рис. 2.

На первом этапе исследования проведен выбор метода моделирования условий взаимодействия слоев старого и нового бетона при приложении нагрузки. Сравнительный анализ различных условий взаимодействия слоев нового и старого бетона проведен с помощью вычислительного эксперимента.

Для моделирования условий взаимодействия слоев старого и нового бетона протестирован элемент связи. Элемент связи комбинирует параллельно свойства упругого сдвига, демпфирования и присоединенного последовательно

зазора. Масса может быть связана с одной или обеими центральными узловыми точками. Элемент имеет одну степень свободы в каждом узле или центральное смещение, вращение, давление и температуру. Масса, упругость, сдвиг, демпфер и/или зазор могут быть удалены из элемента. Соединительный элемент показан на рис. 3. Элемент определяется двумя узлами, двумя упругими константами $K1$ и $K2$ ($\text{Н}/\text{м}$), коэффициентом демпфирования C ($\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}$), массой M ($\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}$), величиной зазора GAP (м или радиан) и силой трения (ограничение скольжения) $FSLIDE$ (Н).

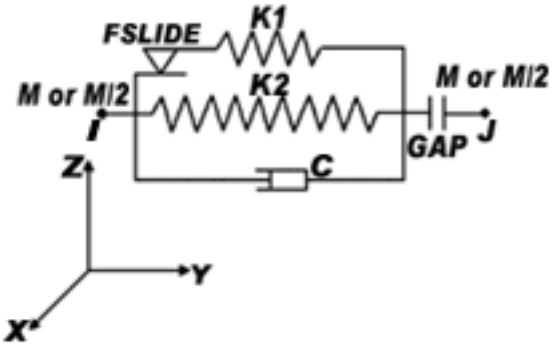


Рис. 3. Соединительный элемент

Для анализа условий контактного взаимодействия слоев двухслойного бетонного образца использованы контактные элементы типа «поверхность-поверхность». Проведен анализ напряженно-деформированного состояния двухслойных образцов из материалов нового и старого бетона. Исследованы условия совместной работы материалов с заданием *б* при контактном слое условий контактного взаимодействия и элементов связи. На рис. 4, 5 представлены результаты анализа. Пунктиром отображено исходное состояние ненагруженного образца. Перемещения для наглядности увеличены в 2000 раз. Нормальные к поверхности контакта перемещения для условия контактного взаимодействия:

– максимальные $-0,431\cdot10^{-5}$ м,

– минимальные $0,166\cdot10^{-5}$ м;

для элементов связи:

– максимальные $-0,434\cdot10^{-5}$ м,

– минимальные $0,165\cdot10^{-5}$ м.

Нормальные напряжения для условия контактного взаимодействия:

– максимальные сжатия $-0,165\cdot10^{7}$ Па,

– максимальные растяжения 398792 Па;

для элементов связи:

– максимальные сжатия $-0,165\cdot10^{7}$ Па,

– максимальные растяжения 365427 Па.

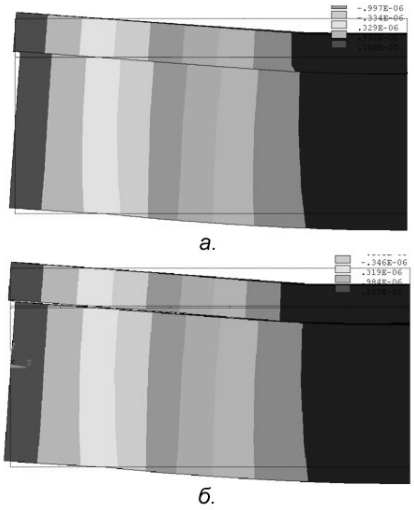


Рис. 4. Поле перемещений (м), нормальных к поверхности контакта:
а – условия контактного взаимодействия; *б* – элементы связи

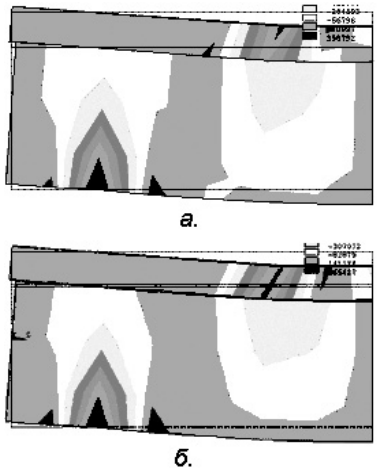


Рис. 5. Поле нормальных напряжений (Па):
а – условия контактного взаимодействия;
б – элементы связи

Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния двухслойных образцов показал как качественную, так и количественную сходимость результатов расчета при задании условий контактного взаимодействия (с коэффициентом трения равным нулю) и взаимодействия слоев через элемент связи.

Для моделирования различных условий сдвиговой прочности приконтактного слоя двухслойного образца были заданы условия контактного взаимодействия между слоями с различными значениями коэффициента трения ($\mu u = 0, 0,3, 0,7$).

В табл. 1 приведены численные значения параметров совместной работы: перемещений, нормальных к поверхности контакта, напряжений и интенсивности напряжений как в образце в целом, так и в отдельных его слоях.

Таблица 1

Численные значения параметров совместной работы

Параметры	Коэффициент трения $\mu и$		
	0	0,3	0,7
Нормальные перемещения, м			
min	$-0,431\cdot10^{-5}$	$-0,390\cdot10^{-5}$	$0,334\cdot10^{-5}$
max	$0,166\cdot10^{-5}$	$0,151\cdot10^{-5}$	$0,131\cdot10^{-5}$
Нормальные напряжения, МПа			
сжатия	$0,165\cdot10^{7}$	$-0,160\cdot10^{7}$	$-0,156\cdot10^{7}$
растяжения			
– весь образец	398792	–	374952
– нижний слой	264173	251380	235171
Интенсивность напряжений, МПа			
приконтактный слой	–	$0,208\cdot10^{7}$	$0,197\cdot10^{7}$
нижний слой	$0,293\cdot10^{7}$	$0,265\cdot10^{7}$	$0,227\cdot10^{7}$

На рис. 6 приведено изменение качественной картины поля интенсивности напряжений в зависимости от коэффициента трения между слоями.

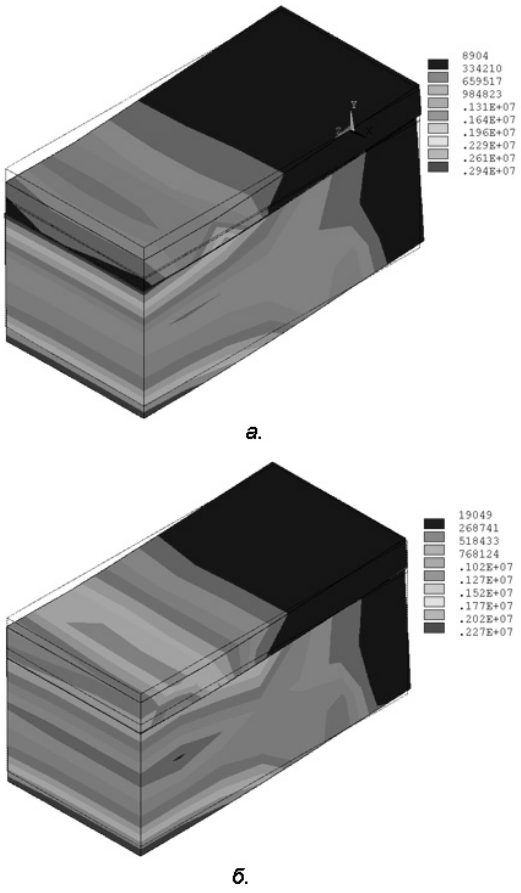


Рис. 6. Поле интенсивности напряжений (Па):
а – $\mu и = 0$; *б* – $\mu и = 0,7$

Сдвиговая прочность – один из важнейших параметров, определяющих совместную работу ремонтного состава и ремонтируемого изделия. Один из вариантов адекватного моделирования этого параметра – это задание коэффициента трения.

С целью проведения сравнительного анализа напряженного состояния двухслойных образцов при различном моделировании условий контактного взаимодействия и учёта разномодульности материалов были исследованы условия совместной работы разномодульных материалов. Модуль упругости: верхнего слоя – $2\cdot10^{10}$ Па, нижнего слоя – $2\cdot10^{10}$ Па. На рис. 7 представлены результаты анализа. Перемещения для наглядности увеличены в 2000 раз.

Перемещения, нормальные к поверхности контакта для варианта с заданием приконтактного слоя:

– максимальные $0,144\cdot10^{-5}$ м,

– минимальные $-0,487\cdot10^{-5}$ м;

для условия контактного взаимодействия:

– максимальные $-0,718\cdot10^{-5}$ м,

– минимальные $-0,585\cdot10^{-5}$ м;

для варианта с элементами связи:

– максимальные $-0,167\cdot10^{-5}$ м,

– минимальные $-0,587e\cdot10^{-5}$ м.

Изменение модуля упругости ремонтного слоя при различных условиях контактного взаимодействия материалов приводит к суще-

ственно различным результатам совместной работы этих материалов.

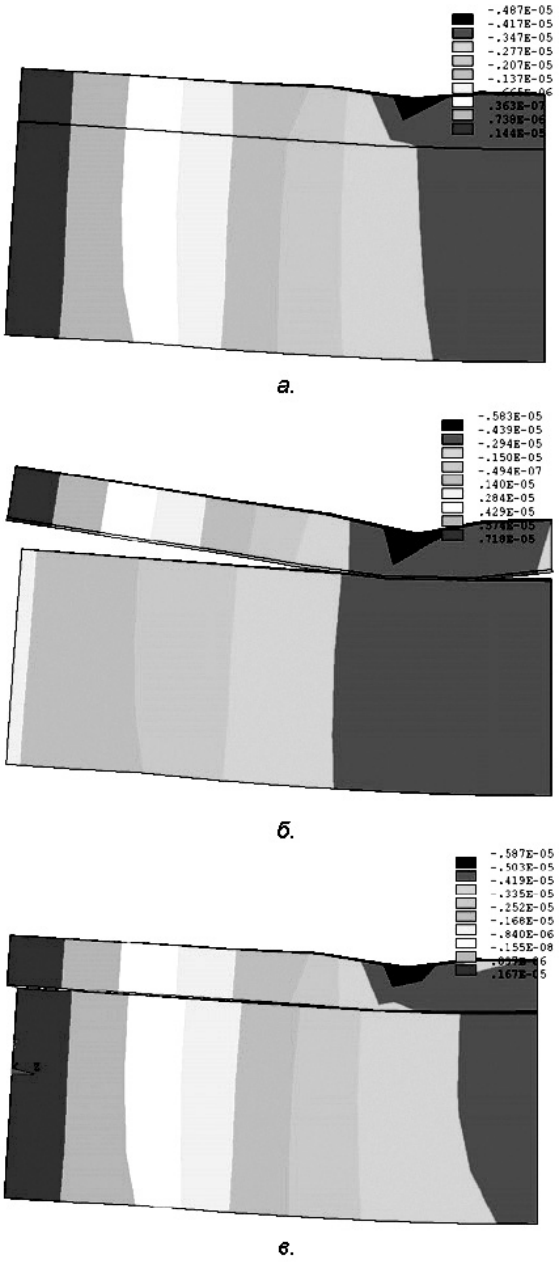


Рис. 7. Поле перемещений (м) нормальных к поверхности контакта:
а – задан приконтактный слой; *б* – задано условие контактного взаимодействия, *в* – заданы элементы связи

Для адекватного моделирования условий контактного взаимодействия многослойных бетонных образцов с помощью метода конечных элементов нужно использовать элемент, который хорошо бы работал на сжатие и на сдвиг и, кроме того, позволял бы разрыв связей между узлами, которые он соединяет (т. е. между слоями) при достижении в нем напряжений, превышающих допустимые. Условие контактного взаимодействия между слоями бетона позволяет адекватно моделировать сжатие и сдвиговую прочность (посредством задания коэффициента трения), но не позволяет моделировать отрыв/отслоение, т. к. не предусматривает связей между поверхностями контакта. Элемент связи, в свою очередь, работает только в одном направлении (не работает на сдвиг) и, как показали исследования (сравнение с контактной задачей), работает адекватно. Элемент связи позволяет моделировать разрыв связи при достижении определённого уровня напряжений. Таким образом, ни контактный элемент, ни элемент связи не удовлетворяют в полной мере нашим требованиям для решения поставленной задачи. Один из вариантов решения этой проблемы – это модификация наиболее подходящего элемента или разработка нового элемента с заданными характеристиками на основе существующих. При определении прочностных свойств ремонтного состава также необходимо учитывать знак и величину деформаций поверхности ремонтируемого изделия (что в подавляющем большинстве случаев не делается на сегодняшний день), которые, в свою очередь, зависят от геометрии этого изделия и действующих на него нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пшинько А. Н. Подводное бетонирование и ремонт искусственных сооружений: Монография. – Д.: Пороги, 2000. – 411 с.
2. Сравнительная оценка эффективности защитных покрытий бетонных конструкций, работающих в жестких климатических условиях / Е. А. Данилов, И. Б. Лозовицкий, В. Г. Челпанов // Сб. научн. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение – Д.: ПГАСА, 2003. Вып. № 25. С. 131–134.
3. Громова Е. В. Вопросы возникновения адгезионной связи в зоне контакта нового бетона со старым // Будівництво: Зб. наук. пр. – Вип. 8. – Д., 2000. – 356 с.

Поступила в редколлегию 26.01.04.

УДК 533.6.013.42; 696.2

В. Е. ВОЛКОВА (ДИИТ)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

У статті подані методика та результати обчислювального експерименту: властивості та особливості змушених коливань нелінійних механічних систем, які описуються нелінійними диференціальними рівняннями. При розробці програмного забезпечення, необхідного для рішення даної задачі, використані методи численного інтегрування (метод Рунге-Кутта 4-го порядку), спектрального аналізу (алгоритм Герцеля), комп'ютерної графіки та ін.

В статье приведены методика и результаты вычислительного эксперимента: свойства и особенности вынужденных бигармонических колебаний нелинейных механических систем, описываемых нелинейным дифференциальным уравнением. При разработке программного обеспечения, необходимого для решения данной задачи, использованы методы численного интегрирования (метод Рунге-Кутта 4-го порядка), спектрального анализа (алгоритм Герцеля), компьютерной графики.

The methods and results of the numerical modelling, qualities and peculiarities of the non-linear mechanical system biharmonic forced oscillations, described by the non-linear differential equation. are presented in the paper. The method of numerical integration (Runge-Kutta method of the fourth order), spectral analysis (Hertzel algorithm), computer graphic were used working out of the software necessary for the solution of the given task.

Периодические колебательные режимы механических систем, динамическое поведение которых описывается уравнением типа Дуффинга, при моногармоническом возмущении достаточно подробно изучены [5]. Наибольший практический и теоретический интерес представляет вопрос о поведении таких систем, в тех случаях, когда внешнее возмущение, оставаясь периодическим, будет изменяться по более сложному закону. Можно ожидать, что в качественной структуре получаемых периодических колебательных режимов произойдут существенные изменения.

Качественное исследование поведения динамической системы сводится к изучению поведения траекторий в фазовом пространстве. Основы качественной теории исследования динамических процессов были созданы Пуанкаре. Исключительная роль в развитии качественных методов исследования динамических систем принадлежит А. А. Андронову [1], Е. А. Леонтовичу, И. И. Гордону, А. М. Ляпунову. Основной задачей классической теории качественного исследования является определение динамических свойств систем без получения замкнутого аналитического решения. С этой целью широко использовались фазовые траектории на плоскости $(y,\dot{y})$.

Отметим, что фазовое пространство динамических систем многомерно. Возможен и иной выбор параметров фазовых плоскостей. Впервые попытка применить фазовые траектории на плоскостях $(y,\ddot{y})$ и $(\dot{y},\ddot{y})$ к исследованию динамических систем была сделана в монографии [2]. Как следует из полученных результатов, фазовые траектории на плоскости $(y,\ddot{y})$ могут быть весьма эффективно использованы для идентификации [3].

Целью данной работы является изучение динамического поведения несимметричных систем с кусочно-линейной упругой характеристикой, получение временных процессов и фазовых траекторий $(y,\ddot{y})$ и $(\dot{y},\ddot{y})$ для различных режимов колебаний и выявление их особенностей

1. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний

Для широкого ряда механических динамических систем внешнее возмущение отлично от моногармонического. Оно может содержать несколько гармоник, имеющих различные амплитуды. Вынужденные колебания таких систем могут быть описаны дифференциальным уравнением вида [4]

$$\ddot{y}+\varepsilon\dot{y}+R(y)=F(t);$$

$$F(t)=F_0+$$

$$+\sum_{i=1}^{n}F_i(t)\cos(\omega_i t)+\sum_{j=1}^{n}F_j(t)\sin(\omega_j t), \quad (2)$$

$$i=1,2,3\ldots n,\ j=1,2,3\ldots n,$$

где y – обобщенная координата; ε – коэффициент демпфирования; $R(y)$ – упругая характеристика системы; $F(t)$ – характеристика внешнего полигармонического возмущения.

Предположим, что упругая характеристика динамической системы нелинейная и изменяется по закону

$$R(y) = -\alpha y + \beta y^3. \qquad (2)$$

Ограничимся случаем несимметричного бигармонического возмущения. Предположим, что характеристика внешнего полигармонического возмущения имеет вид

$$F(t) = F_1 \cos(\omega_1 t) + F_m \cos(\omega_m t), \qquad (3)$$

$$m = 1, 2, 3, \ldots$$

Известно, что характеристика внешнего возмущения является периодической функцией времени t только в случае кратности частот, т. е. $\omega_m = \mu\omega_1$, $\mu = 0, 1, 2, 3, \ldots$ Отметим, что появление стационарных колебаний возможно только при периодическом возбуждении. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать случай кратности частот.

При значениях $\mu = 0$ и $\mu = 1$ формула (2) описывает гармоническое возмущение частотой ω и амплитудами F_1 и $F_1 + F_m$ соответственно.

2. Методика численного моделирования

Для получения на ЭВМ численного решения уравнения (1) был использован метод Рунге-Кутта 4-го порядка. Учитывая сложный характер колебаний нелинейных систем, описываемых уравнением (1), шаг интегрирования Δt выбирался в диапазоне $T/250 \le \Delta t \le T/150$, где $T = 2\pi/\omega$ – период гармонической составляющей внешнего воздействия. Выполнение данного условия обеспечивало устойчивость процедуры численного решения уравнения (1) при всех рассмотренных вариантах значений его коэффициентов.

Для определения амплитуд этих гармонических составляющих был использован алгоритм Герцеля.

3. Анализ полученных результатов

В статье приведены результаты исследования бигармонических колебаний симметричной системы с двумя потенциальными ямами. В качестве эталона была принята система с линейной упругой характеристикой.

На закон изменения внешнего возмущения, в общем случае, достаточно точно можно наложить следующее ограничение – функция $F(t)$ должна удовлетворять условию Дирихле.

Сопоставим поведение изучаемой системы (1) с системами

$$\ddot{y} + \varepsilon\dot{y} + R(y) = F_1 \cos(\omega_1 t); \qquad (4\ a)$$

$$\ddot{y} + \varepsilon\dot{y} + R(y) = F_m \cos(\omega_m t). \qquad (4\ б)$$

Амплитудно-частотная характеристика для уравнения (1) представлена на рис. 1. На рис. 1. ярко выражены две резонансные области, соответствующие резонансам для каждой из гармоник внешнего возмущения. Сопоставление их с амплитудно-частотными характеристиками для систем (4 *а*) и (4 *б*) в области основного резонанса (рис. 2) показывает достаточно близкое совпадение параметров колебаний на резонирующих гармониках. В области второго резонанса наблюдается незначительное расширение частотного диапазона и увеличение амплитуды для системы (4 *б*).

Характеристики субгармонических резонансов порядков $\omega/2$ для систем (1) и (4 *а*) совпадают. В то время как наблюдается незначительное расширения частотного диапазона субгармонических колебаний на частоте $\omega/3$ для случая бигармонического возмущения.

Таким образом, можно сделать заключение, что для некоторых участков характеристики амплитудно-частотных зависимостей могут быть получены, с достаточной точностью, при изучении систем с более простой структурой внешнего возмущения.

Наличие двух гармоник внешнего возмущения приводит к изменениям в структуре проявляющихся периодических режимов. Эти изменения в основном затрагивают частотный диапазон до первого резонанса, и выражаются, прежде всего, в изменении порядков проявляющихся субультрагармонических тонов.

В промежутке между первым и вторым частотными диапазонами системы (1) ярко проявляются резонансные колебания порядка $(\mu+1)\omega/\mu$. Заметим, что в данном диапазоне колебания на частоте ω становятся неустойчивыми, и возникает пара субгармонических режимов на частоте ω/μ (резонансный и нерезонансный). Амплитуда колебаний на гармонике $(\mu+1)\omega/\mu$ быстро возрастает, и в дальнейшем даже превышает амплитуду колебаний на частоте ω.

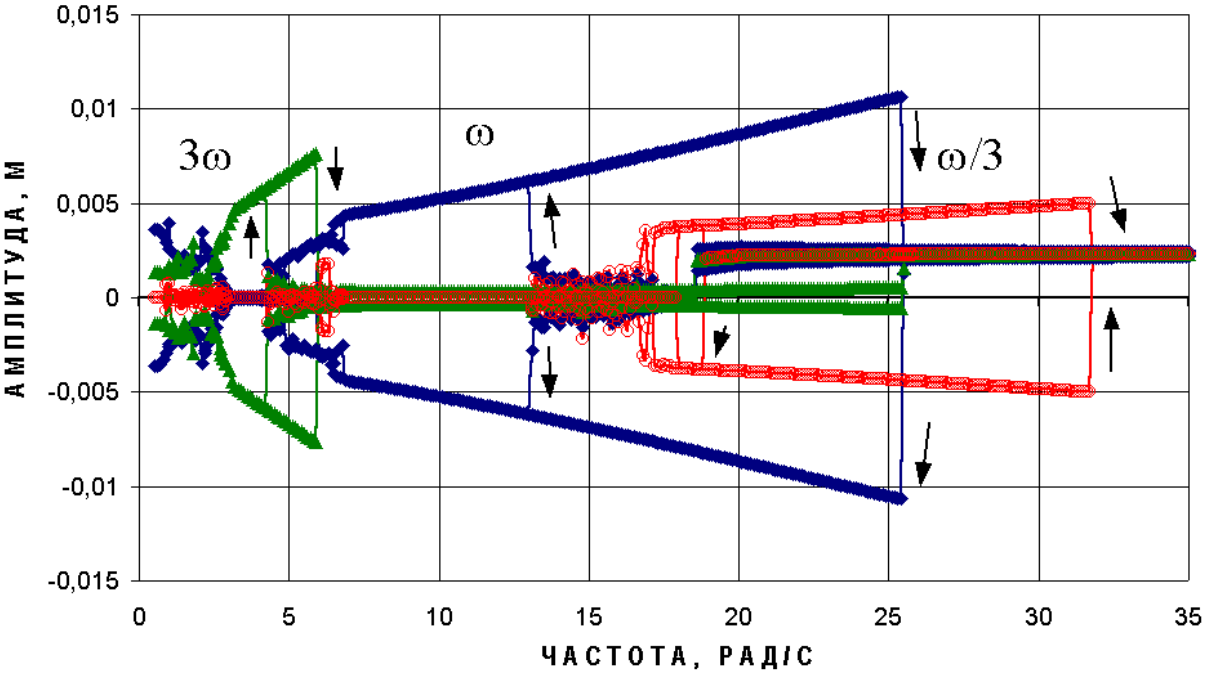


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика симметричной системы с двумя потенциальными ямами:
$\mu = 3$; $\varepsilon = 0{,}5\ с^{-1}$; α=40,8 $с^{-2}$; $\beta = 7660000\ м^{-2}с^{-2}$; $F_1 = 0{,}15\ мс^{-2}$; $F_2 = 0{,}075\ мс^{-2}$

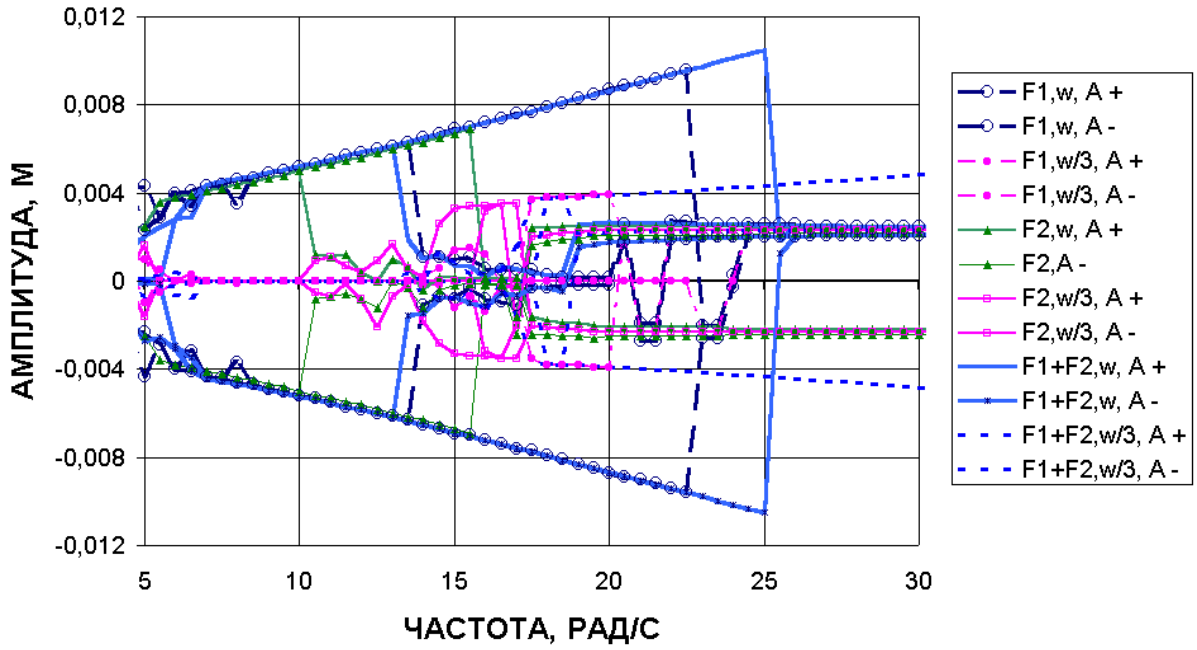
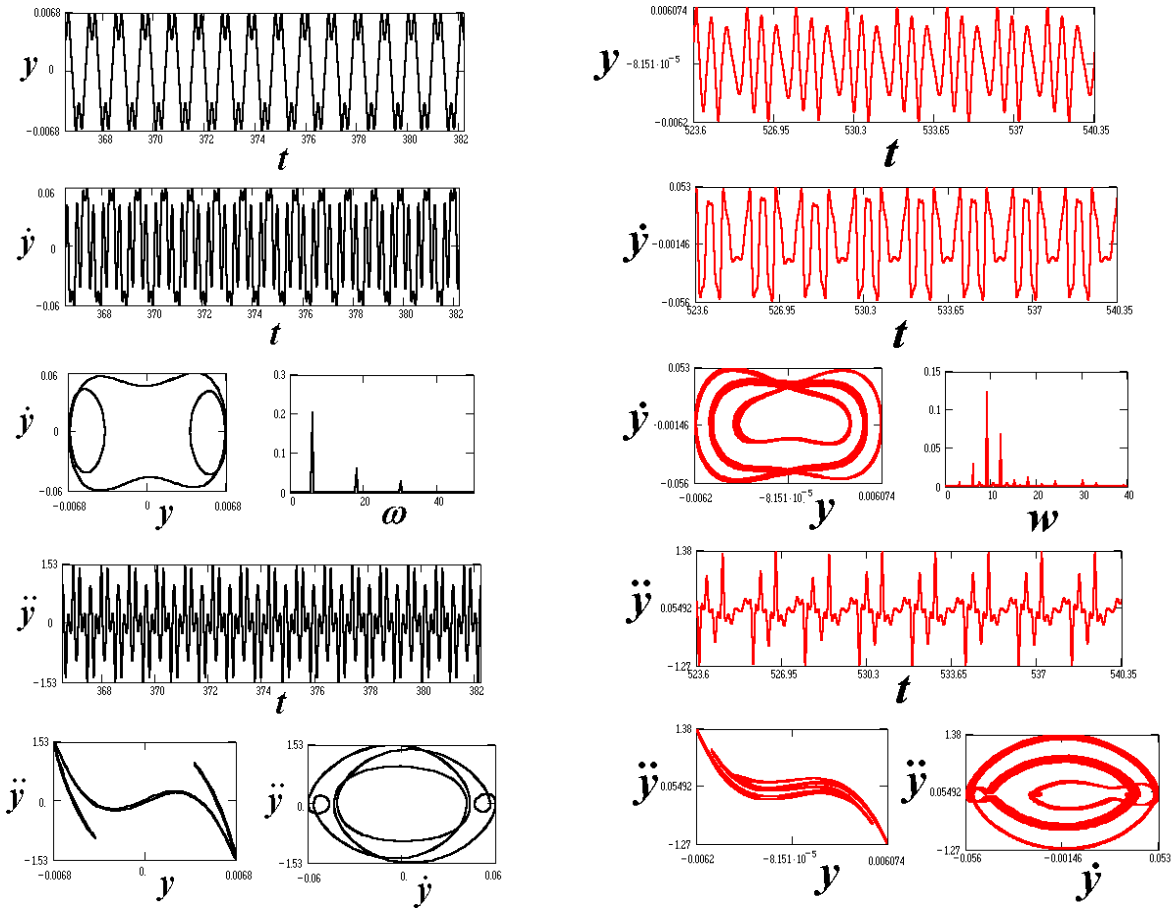


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики симметричной системы с двумя потенциальными ямами при различных видах внешнего возмущения:
$\mu = 3$; $\varepsilon = 0{,}5\ с^{-1}$; α=40,8 $с^{-2}$; $\beta = 7660000\ м^{-2}с^{-2}$; $F_1 = 0{,}15\ мс^{-2}$; $F_2 = 0{,}075\ мс^{-2}$. Диапазон основного резонанса



а *б*

Рис. 3. Временные процессы, спектральные характеристики и фазовые траектории симметричной системы с двумя потенциальными ямами. Диапазон II:
а – моногармоническое возмущение; *б* – бигармоническое возмущение

Обнаружено, что некоторые субгармонические режимы, например, порядков $(2\mu+1)\omega/\mu$ и $(3\mu+1)\omega/\mu$ проявляются не в одном, а в двух частотных диапазонах. При этом наблюдаются многократные бифуркации колебаний на частоте ω и ω/μ, связанные с удвоением периода колебаний (две зоны хаоса для колебаний по первой и второй гармоникам – переходы «малые» колебания – «большие», и наоборот). Амплитуды колебаний на частотах $(2\mu+1)\omega/\mu$ и $(3\mu+1)\omega/\mu$ быстро возрастают (убывают) с изменением частоты внешнего возмущения. Вследствие большой крутизны соответствующих участков амплитудно-частотных характеристик, исследование данных режимов численными методами затруднено. Наличие изолированных (расщепленных) частотных диапазонов, проявление некоторых дополнительных суб- ультра- гармонических режимов, являются следствием того, что частота собственных колебаний существенно нелинейных систем зависит от параметров сравнительно большого числа входящих в решение гармоник.

Устойчивые ветви амплитудно-частотной характеристики системы (1) формируют пять диапазонов частот, для которых получены временные процессы, спектральные характеристики и фазовые траектории на плоскостях $(y,\dot{y})$, $(y,\ddot{y})$ и $(\dot{y},\ddot{y})$. Переход от одного режима вынужденных колебаний к другому сопровождается не только переходом от «больших» колебаний к «малым», или наоборот, но также и появлением колебаний на комбинационных тонах.

Диапазон I ($\omega = 0 \div 3$ рад/с) является областью наложения «малых» ультрагармонических колебаний порядка $n\omega$ ($n = 2,3,4,5\ldots$) на «большие» колебания основного тона как при увеличении, так и при уменьшении основной частоты возмущения.

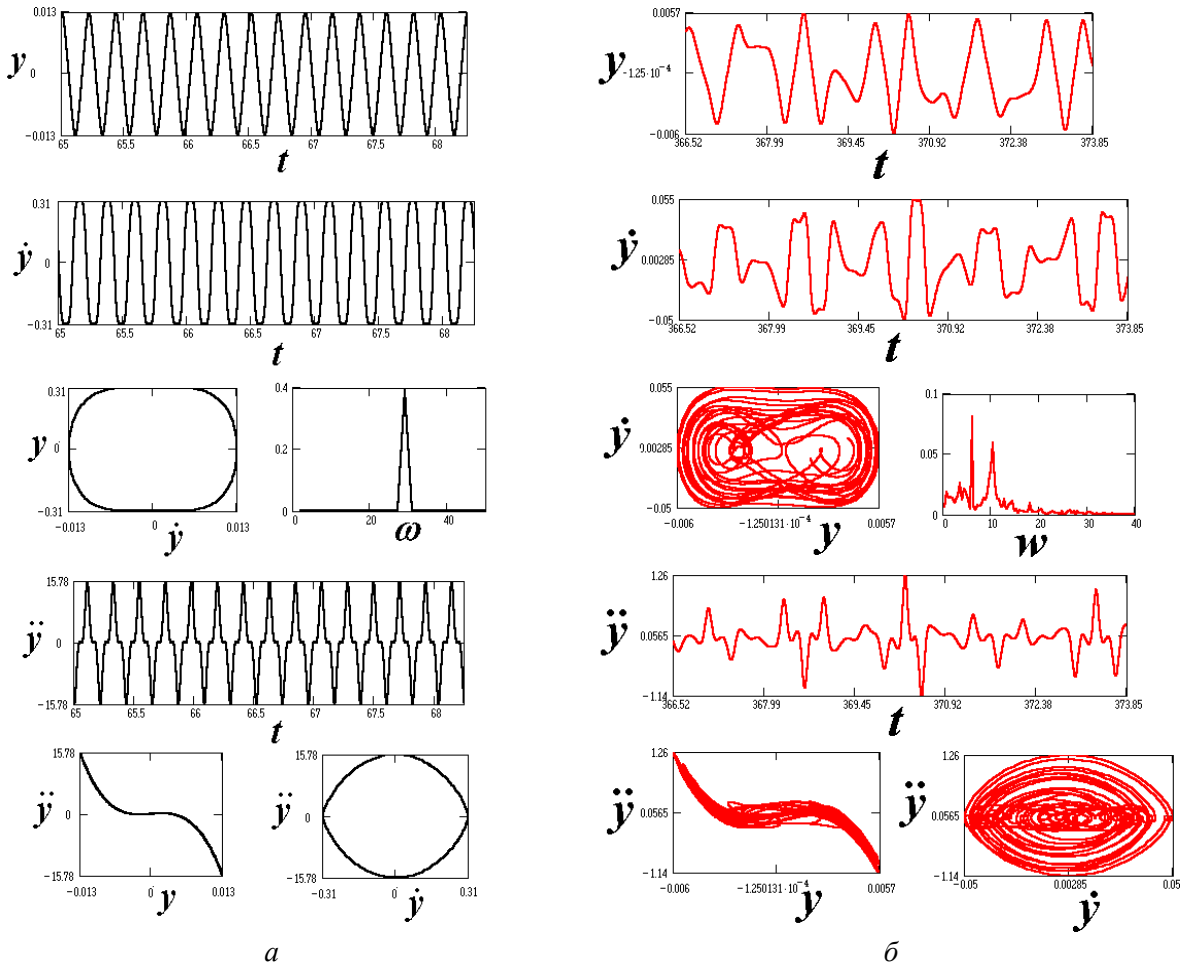
Диапазон II ($\omega = 3 \div 7$ рад/с) – область биений «больших» ультрагармонических колебаний порядка μ и «больших» колебаний основного тона (рис. 4, *б*).

Диапазон III ($\omega = 7 \div 26$ рад/с) характеризуется установлением резонансных «больших» колебаний основного тона при увеличении частот возмущения, и комбинационных ультра- и субгармонических колебаний порядков 2ω, 3ω и $\omega/2$ соответственно при уменьшении частоты внешнего возмущения. Необходимо отметить, что колебания на четных гармониках не устойчивы, так как система симметрична. В данном диапазоне частот возможно возникновение хаотических колебаний (рис. 4, *б*).

Диапазон IV ($\omega = 26 \div 32$ рад/с) – область «больших» субгармонических колебаний порядка $\omega/3$ как при увеличении, так и при уменьшении частоты возмущения.

Диапазон V ($\omega > 32$ рад/с) – является зарезонансной областью, где реализуются только «малые» колебания относительно одного из несмежных положений равновесия. В этом диапазоне возможны скачкообразные переходы от колебаний относительно одного положения равновесия к другому.

На рис. 3, *а* и 4, *а* представлены временные процессы, спектральные характеристики и соответствующие фазовые траектории для системы (4 *а*) для тех же частот низшей гармоники.



а *б*

Рис. 4. Временные процессы, спектральные характеристики и фазовые траектории симметричной системы с двумя потенциальными ямами. Диапазон III:
а – моногармоническое возмущение; *б* – бигармоническое возмущение

С изменением частоты внешнего возмущения спектральный состав решения может кардинально меняться, что следует из анализа представленных амплитудно-частотных характеристик и спектральных характеристик отдельных временных процессов. Бигармоническое внешнее возмущение способствует таким изменениям спектрального состава. Варьируя законом изменения внешнего возмущения, можно получить либо расширения требуемых частотных диапазонов, либо исчезновение нежелательных. Это создает основу для проектирования элементов конструкций, рабочие динамические режимы которых выбираются изначально.

4. Заключение

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что системы с нелинейными упругими характеристиками весьма чувствительны к закону изменения внешнего возмущения. Поэтому широко применяемые при исследовании реальных механических систем допущения, о моногармоническом законе изменения внешнего возмущения, не всегда являются корректными. Так, сравнительно небольшие отклонения формы внешнего возмущения от моногармонического, не оказывают значительного влияния в широких диапазонах частот (резонансы на частотах ω и $\omega/3$), но могут привести к качественным изменениям в прочих диапазонах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андронов А. А., Е. А. Леонтович, И. И. Гордон, А. Г. Майер. Качественная теория динамических систем второго порядка – М.: Главное издательство. Государственное издательство физико-математической литературы, 1966. – 568 с.
2. Казакевич М. И., Волкова В. Е. Динамика систем с двумя потенциальными ямами. – Д.: Арт-Пресс, 2000. – 160 с.
3. Казакевич М. И., Волкова В. Е. Фазовые траектории нелинейных динамических систем. Атлас. – Д.: Наука и образование, 2002. – 94 с.
4. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1979. – 315 с.
5. Бондарь Н. Г. Устойчивость и колебания упругих систем в современной технике(конструкции с прощелкиванием). – К.: Вища шк.,1987. – 200 с.

Поступила в редколлегию 12.02.04.

УДК 624.154.3:550.834

С. А. ГРИШЕЧКІН, Д. І. ДЯДЮШКІН (ДІІТ)

НЕРУЙНІВНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В ДИСПЕРСНИХ ГРУНТАХ

У статті розглянуті результати експериментів з ультразвукового контролю структуроутворення в глинистих ґрунтах. Показаний вплив процесів структуроутворення на швидкість розповсюдження поздовжніх хвиль. Отримані апроксимічні рівняння, які враховують зміну швидкості з часом. Винайдено, що при певній щільності скелета ґрунту процеси структуроутворення ідуть найбільш активно. Запропоновано пояснення цього факту з точки зору теорії іонно-електростатичної взаємодії між дисперсними частинками.

В статье рассмотрены результаты экспериментов по ультразвуковому контролю структурообразования в глинистых грунтах. Показано влияние процессов структурообразования на скорость распространения продольных волн. Получены аппроксимирующие уравнения, которые учитывают изменение скорости со временем. Обнаружено, что при определенной плотности скелета грунта процессы структурообразования протекают наиболее активно. Предложено объяснение этого факта с точки зрения теории ионно-электростатического взаимодействия между дисперсными частицами.

The results of the experiments on ultrasonic monitoring of structure-forming processes in clayey grounds are considered in the paper. An effect of structure-forming processes on propagation velocity of longitudinal waves has been demonstrated. The approximating equations, taking into account the time-dependence of the velocity, have been derived. It has been revealed that the structure-forming processes run most actively at certain density values of the soil skeleton. An explanation to this fact has been suggested from the standpoint of the theory of ion-electrostatic interaction between dispersed particles.

Застосування ультразвукових методів контролю міцності, пружних, пластичних і в'язких властивостей, а також інших показників будівельних матеріалів, виробів і конструкцій уже багато років привертає увагу інженерів. На те є такі їх основні переваги:

- відсутність впливів, що руйнують контрольований матеріал чи конструкцію;
- можливість відтворення дослідів, що дає акустичним методам особливу вірогідність, тому що дозволяє багаторазово випробувати ті самі зразки і вироби, а також готові конструкції в різний час як під час будівництва, так і в процесі експлуатації;
- можливість швидкого проведення контролю і практично «миттєве» одержання результатів, що дозволяє вносити уточнення в технологічний процес.

Відомі приклади застосування акустичних методів для контролю утворення структури гірського масиву під час цементації [1; 2]. Оснований такий контроль на залежності швидкості поздовжніх хвиль від кількості та міцності зв'язків між структурними елементами.

У статті розглянута можливість аналогічного контролю для процесу структуроутворення в дисперсних глинистих ґрунтах.

Ґрунт являє собою частинки, які контактують між собою в деяких точках, проте, між частинками внаслідок нещільного укладення є простір – пори, які заповнені неущільненими коагульованими глинистими частинками [3]. Структура породи ґрунту обумовлюється складом, кількісними компонентами і їх взаємодією. При цьому під компонентами породи розуміють тверду, рідку і газоподібну складові. Структури порід утворюються твердими (мінеральними) структурними елементами, що складають структурний кістяк, і порами, які заповнені рухомими (рідким і газовим) компонентами. Сполучення в об'ємі твердих елементів з порами характеризують зовнішній вигляд структури. При вивченні структури породи велике значення має розгляд структурних особливостей її окремих елементів [5].

Під твердими структурними елементами варто розуміти елементарні мінеральні частки, зерна і їх асоціації, що визначають природну дисперсність породи і формують її структурний кістяк. У глинистих породах виділяють: первинні глинисті частинки, ультрамікроагрегати, мікроагрегати, агрегати, зерна, а також включення залишків мікрофауни і флори, мікрокристалів солей і рудних мінералів.

Інша складова структури породи – пори, що утворюються в результаті нещільного приля-

гання твердих структурних елементів. Загальна величина пористості породи, а також розмір пор і їхня форма залежать від розміру і форми твердих структурних елементів, ступеня їх агрегованості й ущільненості, характеру розподілу в просторі і т. д. Теоретичні розрахунки показують, що пористість модельних глобулярних структур залежить від упакування і може змінюватися від 26 % у ромбоедричної комірки до 47,6 % у кубічної.

Структурні елементи, що складають глинисті породи, взаємодіють між собою не по всій міжфазній поверхні, а тільки в місцях найбільшого зближення – контактах. Число і характер контактів – найважливіші характеристики порід, що обумовлюють структурну зв'язність.

При проведенні акустичного контролю установлюють відповідність між швидкістю поздовжніх хвиль і властивістю середовища, наприклад, щільністю глинистих ґрунтів. Але, глинисті ґрунти являють собою трикомпонентне середовище і, очевидно, співвідношення між фазами визначає швидкість поздовжніх хвиль у середовищі [5].

Для вивчення процесу структуроутворення циліндричні зразки суглинків різної щільності та вологості після виготовлення розташовувалися в ексикаторі, щоб зберегти їх вологість. Періодично в зразках вимірювали швидкість поздовжніх хвиль, зміна якої характеризує розвиток структурних зв'язків у ґрунтах.

У результаті експерименту була встановлена графічна залежність швидкості поздовжніх хвиль від часу при фіксованій щільності і вологості: $\upsilon_{\text{р}} = f(t)$. З'ясувалося, що у випадках, коли заповнювач пор ґрунту є неполярна рідина, то швидкість хвиль з часом не змінюється. Тобто після формування зразків ґрунту додаткові структурні зв'язки не утворюються. Якщо заповнювач повністю відсутній, тобто в зразках із сухого ущільненого порошку суглинку, швидкість поздовжніх хвиль з часом навіть зменшується (рис. 1). Це є ознакою того, що «сухий» контакт між частинками ненадійний і поступово ослаблюється.

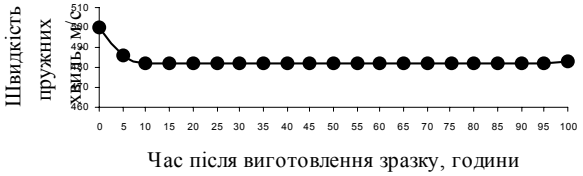


Рис. 1

І тільки за наявності води в зоні контакту між частинками, тобто для зразків з $\omega > 0$, спостерігається зростання швидкості поздовжніх хвиль з часом (рис. 2). Приріст швидкості тим більший, чим більша початкова щільність ґрунту.

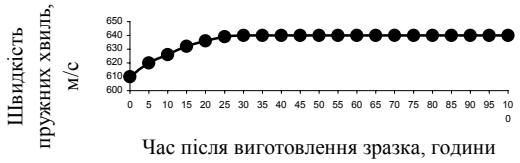


Рис. 2

За результатами експерименту залежність $\upsilon_p = f(t)$ має вигляд [6]

$$\upsilon_p = \upsilon_0 + \upsilon_{пр} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\upsilon_{пр}} t}\right), \qquad (1)$$

де υ_0 – початкова швидкість у зразку при $t = 0$, $\upsilon_{\text{пр}}$ – деякий коефіцієнт, який характеризує приріст швидкості.

У табл. 1 наведені залежності $\upsilon_{\text{р}} = f(t)$ для зразків із середнього суглинку ($I_{\text{р}} = 11{,}2$) з різною вологістю і щільністю.

Таблиця 1

$\upsilon_{\text{р}} = f(t)$, м/с	ω, %	ρ_d, г/см^3
$\upsilon_{\text{р}} = 546 - 146{,}73 \cdot \left(1 - e^{-0{,}00682 \cdot t}\right)$	0,0	1,60
$\upsilon_{\text{р}} = 846 + 258{,}45 \cdot \left(1 - e^{-0.00386 \cdot t}\right)$	4,7	1,60
$\upsilon_{\text{р}} = 745 + 251{,}14 \cdot \left(1 - e^{-0{,}00398 \cdot t}\right)$	10,6	1,59
$\upsilon_{\text{р}} = 582 + 197{,}21 \cdot \left(1 - e^{-0{,}00507 \cdot t}\right)$	19,7	1,61

Значення початкової швидкості υ_0 та коефіцієнта $\upsilon_{\text{пр}}$ дозволяють визначати швидкість поздовжніх хвиль на будь-якому відрізку часу за формулою (1). І відповідно зробити висновок про тривалість процесу структуроутворення.

Характер кривих $\upsilon_{\text{р}} = f(t)$ для даного (табл. 1) та інших досліджених ґрунтів дозволяє стверджувати, що коефіцієнт приросту швидкості $\upsilon_{пр}$ залежить від вологості. Причому залежність $\upsilon_{пр} = f(\omega)$ має вигляд кривої з явним екстремумом (рис 3). Тобто для кожного ґрунту

існує така вологість, при якій приріст швидкості поздовжніх хвиль максимальний. Значення цієї вологості зростає із збільшенням дисперсності ґрунту. Ущільнення скелета ґрунту приводить до збільшення кількості контактів між структурними елементами і, як наслідок, до більшого приросту швидкості поздовжніх хвиль.

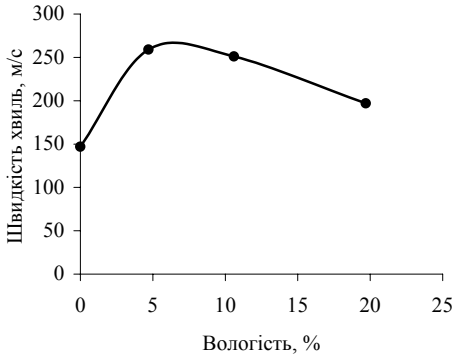


Рис. 3

Характеристикою структуроутворення слід вважати відносний приріст швидкості, тобто в порівнянні з початковою швидкістю. Саме ця величина відображає додаткове зміцнення структурних контактів.

У ході експериментів з'ясувалося, що залежність відносного приросту швидкості від щільності скелета ґрунту є функцією з явним екстремумом. Більш того, виявилося, що значення щільності скелета ґрунту, яке відповідає екстремуму, одне і те ж для зразків з різною вологістю. Це значення відповідає такій щільності скелета ґрунту $\rho_{d\,\text{стр}}$, при якій найбільш активно ідуть процеси структуроутворення. Збільшення дисперсності ґрунту приводить до зменшення величини $\rho_{d\,\text{стр}}$ (рис. 4).

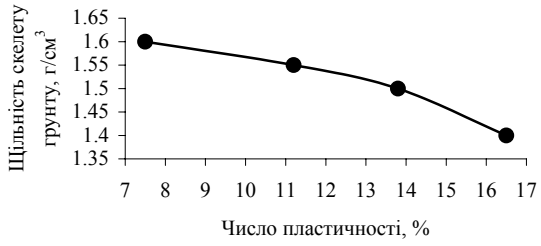


Рис. 4

Це знаходить своє пояснення, зважаючи на той факт, що структуроутворення − процес збільшення кількості та зміцнення іонно-електростатичних зв'язків між дисперсними частинками. При наближені двох дисперсних частинок відбувається перекривання їх дифузних шарів і відповідно зміна розподілу потенціалу між ними. А це, в свою чергу, приводить до збільшення в зазорі між частинками концентрації катіонів, яким енергетично вигідніше розташовуватись в потенційній ямі. За таким розташуванні катіони взаємодіють з поверхнями обох частинок. За рахунок цього і утворюються іонно-електростатичні «містки» між частинками. Переміщення катіонів в потенціальну яму відбувається через водяний заповнювач пор ґрунту. Поверхнева вода є зв'язаною і має підвищену в'язкість. Тому наведення «містків» триває деякий час, що і спостерігається в дослідах, як поступове зростання швидкості поздовжніх хвиль.

Іонно-електростатичні сили взаємодії між дисперсними частинками є силами середнього радіуса дії і стають найбільш суттєвими при наближенні дисперсних частинок на відстань 2–3 нм. І, очевидно, що щільність структуроутворення $\rho_{d\,\text{стр}}$ відповідає саме цьому випадку. Природно, що для більш дисперсних ґрунтів, у яких питома поверхня глинистих частинок більша, $\rho_{d\,\text{стр}}$ зменшується.

Винайдений параметр ґрунту − щільність максимального структуроутворення $\rho_{d\,\text{стр}}$ доцільно враховувати при розробці технології зведення ґрунтових основ.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ляховицкий Ф. М., Хмелевской В. К., Ященко З. Г. Инженерная геофизика. – М., 1989. – С. 206–210.
2. Глушко В. Т., Ямщиков В. С., Яланский А. А., Гришечкин С. А. Определение качества укрепительной цементации и обделки тоннелей. В кн. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. – М., 1987. – С. 247–257.
3. Гольдштейн. М. Н. Механические свойства грунтов. – М., 1973. – 375 с.
4. Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А. Микроструктура глинистых пород. – М., 1989. – 212 с.
5. Гришечкин. С. А. Влияние влажности на скорость распространения упругих волн в дисперсных грунтах // Придніпровський науковий вісник. № 110, листопад 1998. – С. 9–12.
6. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М., 1988. – 239 с.

Надійшла до редколегії 24.10.03.

УДК 666.97:65693.54

Б. Г. КЛОЧКО (ДИИТ), А. А. КУШВИД (строительная компания «Регион»)

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ

У статті наведено результати експериментально-теоретичних досліджень умов руйнування бетону в конструкціях, підданих впливу агресивних середовищ. Наведені можливі механізми мікротріщиноутворювання залежно від структури бетону.

В статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований условий разрушения бетона в конструкциях, подвергнутых воздействию агрессивных сред. Приведены возможные механизмы микротрещинообразования в зависимости от структуры бетона.

The article presents the results of experimental and theoretical studies of the conditions of concrete destruction in the structures, exposed to the influence of aggressive media. The possible mechanisms of micro-crack formation, depending on the structure of the concrete, have been described.

Одним из условий обеспечения долговечности бетонных и железобетонных сооружений является высокая трещиностойкость материала. Как известно [1], в подавляющем большинстве случаев процесс разрушения бетона происходит в результате прорастания одной из трещин или семейства разветвленных трещин через его сечение. Такие трещины часто называют магистральными. При эксплуатации бетонного сооружения магистральные трещины в течение длительного времени не наблюдаются, а затем, появившись и с большой скоростью двигаясь сквозь бетонный массив, быстро его разрушают.

При накоплении усталостных деформаций в бетоне протекают следующие физические процессы: вначале наблюдается образование зародышевых микротрещин, их нестабильный рост, а затем распространение или блокировка трещин в объеме, содержащем структурные элементы (границы заполнителей, поры и полости различного происхождения), являющиеся препятствиями для микротрещин [2].

Для развития представлений о кинетике разрушения бетона сооружения необходимо исследовать процесс образования магистральной трещины. В самом деле, рост магистральной трещины определяется состоянием и процессами в очень малой области – у вершины этой трещины. В бетоне, представляющем собой неоднородный материал, трещины могут развиваться в различных зонах: в цементной матрице, в заполнителе и в контактной зоне [3]. Трещины имеют тенденцию легко проникать из более жесткого в менее жесткий материал. Обратное явление затруднено, то есть возможна остановка трещин на границе раздела компонентов.

Достаточным условием для разрушения образца материала является образование одной или нескольких магистральных, то есть сквозных трещин. При таком условии наличие в бетонном элементе даже значительного числа несквозных трещин еще не говорит о его разрушении; с другой стороны, образование, например, сквозной продольной трещины в сжатом бетонном элементе считается эквивалентным его разрушению, даже если образовавшиеся части еще могли бы выдержать сжимающую нагрузку [4].

Зарождение макротрещины, обусловленное хрупким разрушением в ее вершине, в общем случае не является «гарантом» глобального разрушения элемента конструкции. При хрупком разрушении нестабильное развитие трещины начинается сразу после ее старта, но трещина может остановиться, не разрушив конструкции [5].

Таким образом, надежность конструкции в общем случае определяется не только условиями старта трещины, но и кинетикой ее роста.

Старт трещины при хрупком разрушении реализуется по механизму встречного процесса, который включает зарождение и развитие микротрещины в зоне предразрушения и ее объединение с макротрещиной. Дальнейшее развитие макротрещины возможно по двум альтернативным механизмам [6].

Первый механизм базируется на представлении, что рост макротрещины происходит за счет непрерывного зарождения у ее вершины микротрещин, которые, развиваясь, объединяются с макротрещиной. Иными словами, рост макротрещины есть не что иное, как непрерывный акт зарождения хрупкого разрушения. Очевидно, что при хрупком развитии трещины по первому механизму необходима достаточно большая энергия,

так как непрерывно (по мере роста трещины) должны обеспечиваться необходимые и достаточные условия зарождения макроразрушения, что связано с обязательным наличием меньшего или большего пластического деформирования у вершины движущейся макротрещины.

Второй возможный механизм развития трещины базируется на следующих представлениях. После объединения микротрещины с макротрещиной идет быстрое непрерывное динамическое развитие макротрещины при отсутствии заметного пластического деформирования у ее вершины (недостаточно времени на реализацию релаксационных процессов в вершине). При этом энергия, необходимая для старта трещины, выше, чем энергия, требующаяся на ее развитие. Следовательно, динамическое развитие трещины при хрупком разрушении наиболее вероятно происходит по второму механизму.

С целью исследования изменений, происходящих в структуре бетона в процессе разрушения под действием одноосной сжимающей нагрузки, были проведены эксперименты. При этом установлено, что изменение структуры бетонных образцов проходит четыре стадии. На первой стадии в бетоне возникают внутренние напряжения без образования трещин, то есть бетон ведет себя как упругое тело. Эта стадия продолжается до нагрузки, составляющей около 30 % от разрушающей нагрузки. На второй стадии, при нагружении до 50 % от разрушающей нагрузки, образуются трещины в контактном слое между цементной матрицей бетона и зернами крупного заполнителя. На третьей стадии (до 75 % от разрушающей нагрузки) возникшие трещины расширяются и происходит образование трещин непосредственно в цементной матрице. На последней, четвертой стадии, при напряжениях, превышающих 75 % разрушающей нагрузки, отдельные трещины смыкаются, образуя систему трещин, и начинается разрушение бетона.

Для исследования влияния механических характеристик и состояния поверхности заполнителя на прочность бетона испытывали три типа образцов: балочки, состоящие наполовину из заполнителя и раствора, и призмы с включениями заполнителя. Поверхность заполнителя в различных сериях опытов шлифовали, делали шероховатой, покрывали полиэтиленовой пленкой или приклеивали к раствору эпоксидным клеем. Модельный заполнитель был также изготовлен из раствора. Исследования показали, что прочность сцепления заполнителя с раствором при изгибе не зависит от прочности заполнителя, а прочность сцепления при сдвиге со сжатием (по наклонному сечению) является функцией прочности заполнителя и состояния его поверхности. Независимо от прочности и состояния его поверхности первые трещины в бетоне при осевом сжатии появлялись по поверхности сцепления заполнителя с раствором. При прочности заполнителя ниже прочности раствора в дальнейшем одновременно развивались трещины в заполнителе и в растворной части и, наконец, разрушение от сжатия заполнителя приводило к разрушению бетона. Поэтому прочность бетона зависела от прочности заполнителя.

При прочности заполнителя выше прочности растворной части бетона на последующих стадиях нагружения растворные трещины сливаются с трещинами сцепления, образуя непрерывную систему трещин, параллельных действию нагрузки. На последнем этапе локальное разрушение растворной части вблизи заполнителя приводит к разрушению бетона в целом, поэтому прочность при сжатии такого бетона в основном зависит от прочности раствора. При прочности заполнителя, меньшей прочности раствора, соотношение прочностей раствора и бетона растет при увеличении соотношения прочностей заполнителя и раствора, а при прочности заполнителя, большей прочности раствора, соотношения прочностей бетона и раствора несколько уменьшаются при росте соотношения прочностей заполнителя и раствора. Поэтому использование высокопрочных заполнителей не является обязательным для получения высокопрочного бетона. Шероховатость поверхности заполнителя влияет на прочность сцепления, но слабо сказывается на прочности бетона при сжатии.

По данным [7], бетон при сжатии может разрушаться по одному из трех механизмов: вследствие раскалывания заполнителей, от нарушения сцепления цементной матрицы или раствора с крупным заполнителем или от разрушения самой цементной матрицы. Все три механизма разрушения могут иметь место в бетоне одновременно. Количество плоскостей разрушения при деформации бетона в предельном состоянии уменьшается при увеличении крупности заполнителя, что приводит к снижению прочности бетона. С другой стороны, при увеличении крупности заполнителя возрастает концентрация напряжений, что также снижает прочность бетона.

Для определения путей упрочнения структуры бетона исследован процесс микротрещинообразования образцов на стадии, предшествующей нестабильному развитию трещин. При сравнении влияния мелкого и крупного заполнителей на кинетику развития трещин установ-

лено, что зерна крупного заполнителя вызывают концентрацию напряжений. Это связано с наличием трещин в контактном слое между крупным заполнителем и растворной частью.

При исследовании характера микроразрушений в структуре бетона наибольшее количество трещин наблюдалось в контактной зоне заполнитель – цементная матрица, причем трещины по границе сцепления были открытыми и непрерывными. Во всех составах наблюдалось прохождение трещин сцепления в цементной матрице через поры. Трещины сцепления в большинстве проходили по нижней грани зерен крупного заполнителя. Небольшие неровности зерен не влияли на непрерывность трещин сцепления. Тонкие трещины в цементной матрице обычно распространялись между соседними зернами крупного заполнителя, из которых достаточно было одному иметь трещину сцепления. Трещины сцепления появлялись в результате водоотделения и дифференциальных объемных деформаций.

При исследовании микроструктуры бетона, эксплуатировавшегося в агрессивных условиях, установлено, что микротрещины имели межкристаллический характер. При возрастании влажности среды микротрещины приобретали транскристаллический характер и проходили через кристаллы кальцита, а также через капиллярные и структурные поры или вдоль более крупных микротрещин в бетоне на границах заполнителя и цементной матрицы.

В процессе обследования состояния строительных конструкций, эксплуатирующихся в условиях повышенных температур и при воздействии паров кислот, установлено, что способность раствора противостоять распространению трещин в значительной степени зависит от дисперсности и зернового состава заполнителя. Более высокие значения параметров прочности и трещиностойкости получены у раствора на основе заполнителя, содержащего сравнительно крупные зерна с соответствующей меньшей дисперсностью. Начальные трещины в бетоне имели раскрытие около 30 мкм и сужались к устью до 1 мкм. Траектория роста трещин в бетоне носила извилистый характер в сравнении с цементной матрицей, где микротрещины имели вид ломаной линии. Трещины в бетоне во многих случаях ветвились по трем и более направлениям. Устье трещины часто располагалось около крупных зерен песка или зерна крупного заполнителя. Вблизи конца трещины наблюдалось множество микротрещин. В зоне устья главной трещины зафиксированы диффузионные микротрещины, которые можно рассматривать как зону предразрушения. Размер этой зоны составляет 1–4 мм для цементной матрицы и растворной части.

При исследовании микроструктуры цементной матрицы разрушающегося бетона установлено, что трещины располагаются преимущественно вокруг реликтовых зерен цемента, вдоль кристаллов портландита, которые имеют склонность к раскалыванию, а также проходят через поры. Трещины часто имеют разветвления, зигзагообразные включения длиной около 10 мкм, а также пересечения. Наблюдаются неразрушенные участки цементного камня, являющиеся мостиками прочности. Разрушение бетона происходит при преодолении микротрещиной энергетического барьера и направлено перпендикулярно направлению растягивающих усилий.

Таким образом, при исследовании состояния микроструктуры бетона конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия агрессивных сред, подтверждена необходимость восстановления несущей способности конструкций путем нанесения защитного слоя специального бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ansari F. Analysis of Micro-Cracked Zone in Concrete // Fract. Toughness and Fract. Energy Concr. Proc. Int. Conf. – Amsterdam. – 1985. – P. 229–240.
2. Bochenek A., Prokopski G. Badania Wplywu Stosunku Wodno-Cementowego na Mikromechanism Pecania Betonu Zwyklego // Arch. Inz. Lad. – 1988. – № 2. – P. 261–270.
3. Chatterji S. Probable Mechanisms of Crack Formation at Early Ages of Concretes: A Literature survey // Cem. and Concr. Res. – 1982. – Vol. 3. – P. 371–376.
4. Cotterell Brian, Mai Yiu-Wing. Crack Growth Resistance Curve and Size Effect in the Fracture of Cement Paste // J. Mater. Sci. – 1987. – Vol. 8. – P. 2734–2738.
5. Fanella David, Krajcinovic Dusan. Size Effect in Concrete // J. Eng. Mech. – 1988. – Vol. 4. – P. 704–715.
6. Price Walter H. Control of Cracking of Concrete during Construction // Concr. Int. Des. and Constr. – 1982. – Vol. 1. – P. 40–43.
7. Struble L. J., Stutzman P. E., Fuller E. R. Microstructural Aspects of The Fracture of Hardened Cement Paste // J. Amer. Ceram. Soc. – 1989. – Vol. 12. – P. 2295–2299.

Поступила в редколлегию 26.01.04.

УДК 622.131.042

А. К. БУГАЕВ (Укрзалізниця), С. В. ЦЕПАК, А. Л. ТЮТЬКИН (ДИИТ)

АРМИРОВАНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА КАК СПОСОБ ЕГО РАБОТЫ В СТАДИИ УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

У роботі представлені основи технології армування земляного полотна як спосіб його роботи у пружній стадії, наведено прийоми з його реалізації. Доведена необхідність удосконалення способів армування, надані рекомендації щодо застосування його альтернативних видів.

В работе представлены основы технологии армирования земляного полотна как способ работы его в упругой стадии, приведены приемы его реализации. Доказана необходимость совершенствования способов армирования, даны рекомендации по применению его альтернативных видов.

The work represents the fundamentals of ground bed reinforced technology, as a mode of its work at resilient stage. Examples for its realisation are provided. The necessity of improvement of reinforcement methods has been substantiated; recommendations for application of its alternative kinds have been developed.

Технология армирования земляного полотна для повышения его прочности и устойчивости достаточно разработана различными авторами [1; 2]. Проблема этой технологии заключается в недостаточной обоснованности параметров армирования, таких как глубина закладки, вид армирующего материала, а также в четком понимании физических процессов, которые происходят в композитной системе «армирующий материал – грунт земполотна». К этому прибавляется и тот факт, что динамическая поездная нагрузка, взаимодействуя с грунтом насыпи (балластной призмы) и земполотном, добавляет в постановку вопроса об армооснованиях большую долю неоднозначности. А появившаяся в Украине новая тенденция о переходе железных дорог на высокие скорости движения составов делает эту проблему особенно актуальной. Важен также и тот факт, что наряду с достаточной проработанностью технологии производства работ и удовлетворительными, но недостаточными, знаниями физических процессов в армооснованиях, недостаточно освещается проблема мониторинга, то есть прогнозирования поведения и комплекса исследований единого армо-грунтового сооружения.

Как известно, большинство земляных полотен (оснований) в Украине представлено нескальными грунтами, достаточно сильно проявляющими пластические свойства при превышении предельной нагрузки на них и реологические свойства (ползучесть), проявляющимися при постоянных нагрузках, которые меньше разрушающих. Анализ работы земполотна показывает, что его напряженно-деформированное состояние (НДС) по глубине неоднородно, что выражается в зональности вида деформирования. На рис. 1 показана схема образования поверхностей скольжения при выпоре грунта на откос, прямо связанная с неоднородностью НДС.

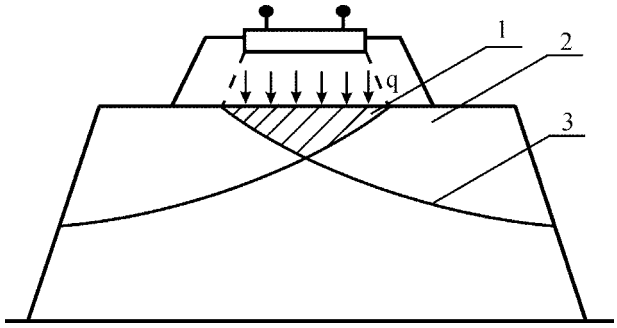


Рис. 1. Схема выпора грунта на откос: *1* – область ярко выраженного пластического деформирования; *2* – область упругопластического деформирования; *3* – поверхность скольжения (разрушения)

Сущность этого явления такова: при отсутствии поездной нагрузки земполотно работает в стадии некритических напряжений (упругая стадия), деформации практически пропорциональны напряжениям. Наряду с этим происходят и некоторые отрицательные изменения в теле насыпи, связанные со старением и геологическими факторами – изменяется прочность из-за влагопереноса и перестройки структуры грунта, но если эти явления не носят катастрофического характера, то прочность уменьшается незначительно. Во время проезда поезда из-за увеличившейся статической нагрузки, а также из-за пульсационных воздействий происходит перераспределение напряжений, причем деформации увеличиваются в сторону пластических. А, как известно [3], пластическая деформация всегда предшествует разрушению.

Несомненно, прочность грунта земполотна значительна, поэтому разрушение (выпор, скольжение части земполотна и другие эффекты, связанные с пластическим деформированием) не происходит мгновенно – деформации накапливаются, на некоторых площадках появляются микротрещины (площадки, на которых исчерпался запас прочности из-за пластических деформаций), затем происходит их слияние в поверхность скольжения. Причем еще раз подчеркивается неоднородность НДС земполотна, зональность деформирования, то есть одновременное наличие упругой зоны, переходной упругопластической и ярко выраженной пластической. Причем, деформации после проезда поезда частично восстанавливаются (упругие) и не восстанавливаются вообще (пластические). Наличие только невосстанавливающихся (пластических) деформаций свидетельствует о критическом состоянии земполотна.

Из анализа поведения земполотна в различные моменты его существования можно сделать вывод: чем более однородно НДС земполотна, а точнее, чем ближе деформированное состояние земполотна к упругому, тем его эксплуатация будет более долговечной. Рассмотрим некоторый элемент земполотна и его НДС (рис. 2).

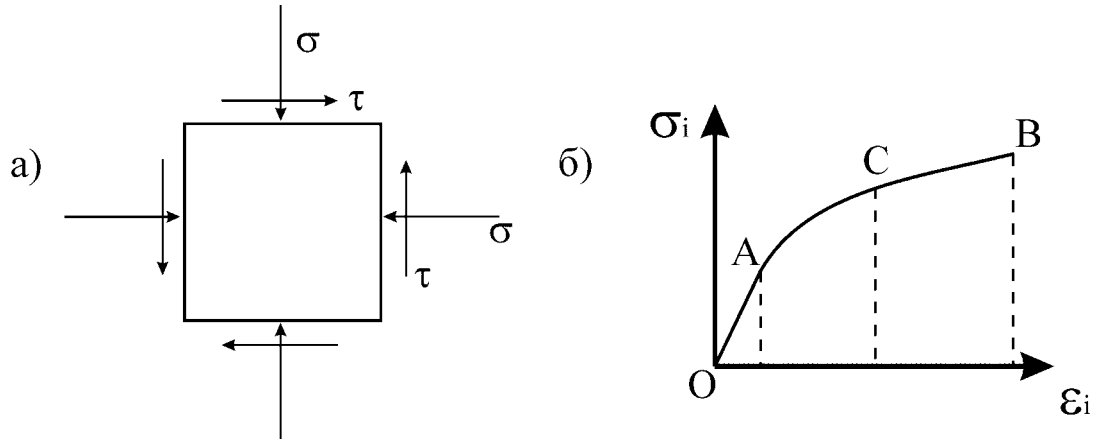


Рис. 2. Схема земполотна: *а* – выделенный элемент земполотна; *б* – график $\sigma - \varepsilon$

Деформирование от некоторого сочетания нормальных σ и касательных τ напряжений, которые изменяются, может быть показано в виде графика зависимости $\sigma - \varepsilon(\tau - \gamma)$. Участок ОА этого графика – деформирование в пределах упругости, участок АВ – пластическое деформирование, причем в точке В происходит разрушение. Из вывода, приведенного выше, следует, что на множестве площадок поперечного сечения земполотна должно сохраняться лишь упругое деформированное состояние, то есть деформирование, соответствующее участку ОА. Понятно, что добиться этого в действительности практически невозможно, поэтому к стадии чисто упругого деформирования следует добавить некоторый участок пластического деформирования до точки С. Положение точки С, предела накопления пластических деформаций, которые не могут развиться до критических разрушающих, должно определяться из условий важности грунтового сооружения (примерно 30…40 % от чисто пластической деформации). Стремление этого предела к точке В чревато катастрофическими последствиями, стремление к точке А – будет недостаточным использованием несущей способности грунта.

Одним из эффективных методов нормальной эксплуатации земполотна в упругой стадии деформирования является его армирование. В рамках данной статьи рассматривается не классический вид армирования, предложенный авторами – армирование тростником. В отличие от синтетических материалов, требующих затрат на химическое производство, пропитанные антисептиком тростниковые плиты не менее долговечны и прочны. Имеющийся опыт создания тростниковых элементов крепи и укрепления плотин альтернативными методами [1; 2] свидетельствует в пользу их применения. Известно также, что георешетки (типа СЖ-1), к которым наиболее близки по свойствам тростниковые плиты, значительно увеличивают прочность композитной структуры, чем любые нетканые геотекстильные материалы типа Дорнит, СТПК-3 [4]. Помимо уже приведенных достоинств, важным является и тот факт, что система «грунт – тростниковая плита» имеет возможность постепенного перестраивания структуры без потери заданных характеристик за счет постепенной самоорганизации грунта вокруг тростниковой плиты. Особо важна технология размещения тростниковых плит: для большей эффективности их следует размещать в

прогнозируемых или рассчитанных заранее зонах повышенных напряжений, но с тем расчетом, чтобы дальнейшая эксплуатация земполотна (например, замена щебня путевыми машинами) не повредила уложенные плиты и не привела к катастрофически быстрому разрушению конструкции.

Несомненно, представленные рассуждения дают возможность многочисленных исследований в области армированных оснований, которые позволят более точно решать задачи по определению параметров армирования в каждом конкретном случае, причем существующие сегодня компьютерные технологии помогут получить эти решения. Постановка этих задач является важным вопросом нормальной дальнейшей эксплуатации и мониторинга важных и ответственных сооружений, которыми являются элементы земполотна железных дорог при обычных и повышенных скоростях движения составов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимофеева Л. М. Армирование грунтов. Теория и практика применения. Ч. I. Армированные основания и подпорные стены. – Пермь: ППИ, 1991. – 478 с.
2. Джоунс К. Д. Сооружения из армированного грунта. Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1989. – 280 с.
3. Финкель В. М. Физика разрушения. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
4. Балашова Ю. Б. Методика визначення несучої здатності слабких основ з урахуванням реологічних параметрів ґрунту // Автодорожній комплекс України в сучасних умовах: проблеми і шляхи розвитку: Зб. наук. праць. – К.: УТУ, 1998. – С. 88–92.

Поступила в редколлегию 06.10.03.

УДК 691.175:69.059

Т. В. МАМОНОВА (ДИИТ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НАПОЛНЕННЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ АЛКИЛРЕЗОРЦИНОВ

У статті наведено результати експериментально-теоретичних досліджень особливостей структуроутворення наповнених композицій на основі алкілрезорцинів. Показано високу ефективність розчинів для улаштування протифільтраційних екранів на спорудах, що експлуатуються в умовах впливу ґрунтових вод.

В статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований особенностей структурообразования наполненных композиций на основе алкилрезорцинов. Показана высокая эффективность растворов для устройства противофильтрационных экранов на сооружениях, эксплуатирующихся в условиях воздействия грунтовых вод.

The article presents the results of experimental and theoretical study of structure-forming peculiarities in alkylresorcin-based filled-in composites. A high efficiency of the mortars for construction of anti-filtration screens in facilities, operated in conditions of exposure to ground waters, has been demonstrated.

Применение обычных цементно-песчаных растворов для устройства защитных экранов недостаточно эффективно по следующими причинам: такие растворы не обладают высокой степенью водонепроницаемости и стойкостью к агрессивным воздействиям, получение равнопрочного сцепления поврежденного бетона конструкций с раствором не представляется возможным, деформативные характеристики растворов отличны от характеристик бетона конструкций, растворы характеризуются длительными сроками твердения. К числу недостатков относится также усложнение технологического процесса ремонтно-восстановительных работ при отрицательных температурах воздуха. В связи с этим необходима разработка новых материалов, обеспечивающих проектные свойства защитного слоя. Для этого вязкость ремонтных смесей должна быть близкой к вязкости воды, ее первоначальное значение должно сохраняться либо незначительно изменяться в течение технологического времени, а потеря текучести раствора – в строго регулируемые сроки.

Применение полимерных композиций является одним из перспективных направлений в защите транспортных сооружений от грунтовых вод. Кроме того, полимерные материалы отличаются повышенным сцеплением с основными строительными материалами.

Однако применение традиционных полимерных композиций, используемых при ремонте конструкций сооружений, непосредственно не контактирующих с грунтовыми водами, не всегда возможно в особых условиях восстановления подземных туннелей и других элементов, подвергаемых обводнению. Сложность состоит в изменении свойств ремонтных смесей при их нагнетании в пустоты, щели и трещины вследствие массо- и теплообмена с заобделочным пространством. Таким образом, необходим поиск новых компонентов ремонтных смесей, обеспечивающих сохранение технологических характеристик в процессе проведения работ, а также проектные эксплуатационные свойства. Из этого сложного комплекса основное внимание следует уделить изучению закономерностей распространения гидроизолирующего раствора переменной вязкости в массиве при устройстве противофильтрационного экрана с учетом сроков потери текучести, а также исследованию прочности и долговечности укрепления в зависимости от среды и температуры.

Для расширения возможности использования полимеров для работ такого рода необходим поиск новых материалов, позволяющих осуществить замену дорогостоящих химических продуктов другими, экономически эффективными и равноценными по эксплуатационным характеристикам. С этой целью исследованы полимерные растворы на основе сланцефенольной композиции.

Фенольный компонент, суммарный экстракт сланцевых фенолов из подсмольной воды, входящий в композицию в количестве 60 %, содержит до 90 % высокоактивных алкилрезорцинов. В качестве наполнителя полимерного раствора использована пыль-унос цементных заводов, образуемая в процессе обжига сырьевой смеси во вращающихся печах, которая выносится газами в дымовую трубу и улавливается электрофильтрами, Пыль-унос представляет собой смесь не полностью обожженного дека-

роонизированного сырья и состоит из мельчайших частиц низкоосновных клинкерных минералов и щелочных соединений, возгоняемых из сырьевой смеси. Пыль-унос характеризуется высоким содержанием щелочей до 14 %, которые находятся в свободном состоянии [1], удельная поверхность – около 600 $м^2$/кг, что увеличивает проникающую способность наполненных полимерных растворов в трещины и поры бетона конструкций. Кроме того, использование высокощелочной пыли для полимерных растворов дает возможность наиболее эффективно утилизировать отходы производства и значительно расширить ассортимент растворов для устройства противофильтрационной защиты сооружений, эксплуатирующихся в условиях обводнения.

Необходимое количество наполнителя в соотношении полимер – наполнитель от 1:1 до 2:1 вводилось в водный раствор алкилрезорцина с отвердителем и регуляторами сроков потери текучести, в качестве которых использованы хлористый кальций и кальцинированная сода.

Структурно-механические и физико-химические свойства наполненных полимерных растворов зависят от свойств минерального наполнителя и полимерного связующего, их количественного соотношения, способа приготовления композиции и режима отверждения.

В отличие от цементных растворов, структурообразование в такой системе обусловливается двумя одновременно протекающими процессами: полимеризацией смолы и гидратацией клинкерных минералов, содержащихся в цементной пыли. При совмещении этих столь различных по свойствам веществ образуются материалы со сложной органо-минеральной структурой и специфическими особенностями, заимствованными как у цементов, так и у полимеров [2].

Вязкость наполненных полимерных растворов на основе алкилрезорцинов находится в прямой зависимости от количества вводимых добавок (формалин, кальцинированная сода, хлористый кальции) и концентрации минерального компонента. Например, исследованиями установлено, что при введении в раствор 50 % пыли-уноса от массы смолы вязкость на начальной стадии равна $20 \cdot 10^3$ Па·с, а при содержании пыли-уноса 60 и 80 % соответственно $27 \cdot 10^3$ и $48 \cdot 10^3$ Па·с. Из результатов экспериментов, следует, что при концентрации в растворе пыли-уноса 60–90 % на определенном промежутке времени кальцинированная сода вызывает коагуляционное разжижение, то есть понижение вязкости. В растворах с добавкой хлористого кальция это явление не наблюдается.

Полимерные растворы с наполнителем пыль-унос характеризуются удовлетворительной прокачиваемостью и отсутствием седиментации. Наполненные полимерные растворы на основе алкилрезорцинов относятся к вязко-дисперсным системам, для которых характерно наличие статического напряжения сдвига (внутренней структуры). Одна из первых попыток объяснить эти процессы была сделана при создании теории Бунгерберга де Ионга [3], который предположил, что структурная сетка образуется вследствие обнажения отдельных участков поверхности частиц из-под сольватной оболочки и последующего их слияния. А. И. Рабинерсон вообще не учитывал роли сольватных оболочек, считая, что цепочечная структура возникает в результате непосредственного контакта твердых частиц дисперсной фазы в зависимости от поверхностных свойств, в которых возникающие структуры можно разделить на рыхлые и компактные. Другие исследователи объясняли возникновение структуры увеличением сольватации частиц, уделяя большое внимание эластичным свойствам сольватных оболочек.

Объединяет противоположные мнения о процессах структурообразования теория, развитая П. А. Ребиндером и его школой, согласно которой структуры дисперсных систем можно разделить на возникающие в суспензиях, а также в коллоидных и малоконцентрированных системах. Первые обусловлены упругостью сольватных оболочек, препятствующих взаимодействию частиц, и определяют стабильность системы. Структуры второго типа могут возникать в тех случаях, когда частицам свойственна анизодиаметричность формы. Частицы, имея на углах и ребрах утонченные сольватные пленки, легко взаимодействуют молекулярными силами в этих активных центрах и образуют сетчатую структуру.

По характеру связей между отдельными элементами все структуры делятся на обратимые коагуляционно-тиксотропные и необратимые конденсационно-кристаллизационные, к которым относятся наполненные полимерные растворы. Контакты между элементами конденсационно-кристаллизационной структуры возникают в результате образования прочных химических связей, а также при сращивании кристаллов в процессе выкристаллизовывания. Для таких структур характерны упругохрупкие свойства: разрушение связей между частицами таких систем происходит необратимо.

Полимерные растворы с наполнителем пылью-уносом характеризуются более высокими значениями статического напряжения сдвига. Например, статическое напряжение сдвига раствора, содержащего 28 % формалина, 1,5 % кальцинированной соды и 50 % пыли-уноса, равно $4,9 \cdot 10^{-1}$ Па, его значения возрастают пропорционально количеству наполнителя (таблица). Статическое напряжение сдвига также зависит от содержания в смеси отвердителя и регуляторов отверждения.

Таблица

Реологические характеристики наполненных растворов на основе алкилрезорцина

Свойства	Содержание минерального наполнителя от массы смолы, %				
	50	60	70	80	90
Статическое напряжение сдвига, Па	0,51	0,95	1,51	2,35	3,37
Вязкость, 10^3 Па·с	20	27	33	49	79

Примечание. Состав раствора: алкилрезорцин, вода, формалин – 1 : 0,72 : 0,28

Таким образом, концентрация твердой фазы, конфигурация частиц и их поверхностные свойства оказывают существенное влияние на внутреннюю структуру полимерных растворов. При этом, чем выше дисперсность наполнителя и его концентрация, тем полнее развиваются процессы структурообразования.

Весьма важным условием, успешного применения наполненных полимерных растворов для устройства противофильтрационной защиты является отверждение фильтрата. В этом случае фильтрат способен отверждаться при разбавлении смолы водой в соотношении не более 1:1 и содержании формалина не менее 26 %. При понижении концентрации отвердителя поликонденсация протекает медленнее процесса взаимодействия клинкерных гидратов со смолой, в результате чего смесь твердеет на фоне гидратации клинкерных минералов [4].

Применяемые в качестве регуляторов отверждения хлористый кальций и кальцинированная сода оказывают различное влияние на сроки потери текучести. С увеличением количества хлористого кальция время отверждения наполненного раствора сокращается. Кальцинированная сода в сочетании с пылью-уносом уменьшает сроки потери текучести.

Жидкая фаза цементного теста представляет собой в основном раствор сульфатов, гидроксида кальция, калия, натрия и соответствует условию равновесия реакции

$$CaSO_4 + 2(K, Na)OH = $$

$$= (K, Na)_2 \cdot SO_4 + Ca(OH)_2 . \quad (1)$$

Кальцинированная сода связывает ионы кальция в нерастворимый углекислый кальций $CaCO_3$, что уменьшает их общее количество и нарушает процесс структурообразования наполненного раствора. В результате этого процесс идет по пути образование менее прочной структуры.

В связи с тем, что при введении в качестве наполнителя пыли-уноса роль связующего существенно принадлежит алкилрезорцину, введение кальцинированной соды, являющейся ускорителем процесса поликонденсации, приводит к сокращению сроков отверждения. Например, наполненный полимерный раствор, содержащий 26 % формалина, 2 и 3 % кальцинированой соды и 50 % пыли-уноса, теряет текучесть через 6 ч 20 мин и 4 ч 20 мин при одинаковом содержании полимерной составляющей.

Твердение наполненных полимерных растворов сопровождается некоторой усадкой, величина которой зависит от содержания воды. Объемные изменения в такой системе после схватывания происходят по более сложным законам, чем у цементов, и затухают с завершением процесса отверждения смолы.

Механизм структурообразования и физико-химические явления, протекающие при отверждении наполненных полимерных композиций до настоящего времени не имеют достаточно точного объяснения. Существуют лишь общие представления о процессах, происходящих при структурообразовании, основанные на наблюдении чисто внешних проявлений. Вероятно, при взаимодействии полимерного и неорганического компонентов образуется кристаллизационная структура.

Результаты комплексных физико-химических исследований наполненных полимерных растворов на основе алкилрезорцинов показали, что водорастворимые смолы активно взаимодействуют с клинкерными минералами наполнителя и их новообразованиями, вследствие чего создается мелкокристаллическая структура с большим количеством низкоосновных гидросиликатов кальция. В то же время гидратация клинкерных минералов в растворах синтетических смол имеет ограниченный ха-

рактер и не является определяющим условием получения прочного камня.

Очевидно, большую роль в упрочнении структуры играет сам полимер, который благодаря высоким адгезионным и аутогезионным свойствам связывает минеральные частицы и гидратные новообразования в единый конгломерат.

Таким образом, в результате проведенных исследований реологических свойств наполненных композиций на основе алкилрезорцина установлена высокая эффективность их применения для устройства противофильтрационных экранов на сооружениях, эксплуатирующихся в условиях воздействия грунтовых вод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение цементной пыли для цементирования нефтяных и газовых скважин с температурой 20…100 °С / М. О. Ашрафян, А. И. Булатов, Д. Ф. Новохацкий, Н. А. Иванова // Нефтяная и газовая промышленность. 1998. – № 6. – С. 6–7.
2. Соломатов В. И. Полимерцементные бетоны и пластбетоны. – М.: Стройиздат, 1988. – 346 с.
3. Булатов А. И. Основы физико-химии промывочных жидкостей и тампонажных растворов. – М.: Недра, 1988. – 268 с.
4. Черкинский Ю. С. Полимерцементный бетон. – М: Госстройиздат, 1960. – 432 с.

Поступила в редколлегию 22.09.03.

УДК 624.271

В. В. МАРОЧКА (ДІІТ)

УРАХУВАННЯ ГІДРОМЕХАНІКИ ДЕМПФЕРІВ ПРИ ГАСІННІ КОЛИВАНЬ ПРОГІННИХ БУДОВ МОСТІВ

Розроблено багато методів гасіння вимушених коливань прогінних будов мостів з використанням гідродемпферів. Дана робота присвячена більш детальному розрахунку гідродемпферів, а саме основних робочих характеристик. Наведені рекомендації щодо оптимізації робочих характеристик гідродемпферів.

Разработано много методов гашения вынужденных колебаний пролётных строений мостов с использованием гидродемпферов. Данная работа посвящена более детальному расчету гидродемпферов, а именно основных рабочих характеристик. Даны рекомендации относительно оптимизации рабочих характеристик гидродемпферов.

There are many methods of damping the oscillations in bridge girders with the use of hydraulic dampers. The offered paper is devoted to more careful calculation of the dampers themselves, in particular – their basic working characteristics. Recommendations have been given concerning optimization of operational characteristics of the dampers.

У літературі [1] доведена можливість використання та способи встановлення гідродемпферів для гасіння коливань прогінних будов мостів. Ефективність встановлення гідродемпферів доведена в літературі [2], де наведені детальні розрахунки щодо встановлення цього типу демпферів. Але деякі грубі припущення цієї методики не дають змоги використати дані розрахунки на практиці.

У даній роботі наведена спроба врахувати вплив цих припущень. Для даного способу гасіння зручно використовувати дросельні демпфери – демпфери з одним степенем вільності, що мають дросельні елементи опору (рис. 1). Використання цього типу демпфера обґрунтовується можливістю значних статичних деформацій конструкції, що розглядається, під тимчасовим навантаженням. Поршнем демпфера *1* рідина послідовно видавлюється з циліндра *2* або всмоктується в нього, проходячи через вузький канал – дросель *3*.

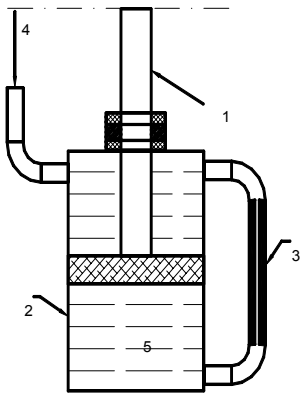


Рис. 1. Конструкція дросельного гідродемпфера

В отвір 4 під певним тиском подається робоча рідина для компенсації випадкових втрат.

У літературі [3] докладно описана теорія розрахунку цього типу пристроїв. Демпфер, що має поршень радіусом R, наповнений робочою рідиною, що має динамічну в'язкість μ та густину ρ. Дросель приймаємо круглого перетину, радіусом r та довжиною L. Коефіцієнт демпферного опору та приєднана в дроселі маса відповідно мають значення:

$$C_r = 8\pi\mu\Lambda_r^4 L; \qquad (1)$$

$$m_o = \frac{4}{3}\Lambda_r^4\pi \cdot r^2 L\rho, \qquad (2)$$

де $\Lambda_r = \frac{R}{r}$ – відносна ширина демпфера.

Узявши до уваги, що робота даної конструкції передбачається в широкому температурному діапазоні, необхідно враховувати залежність динамічної в'язкості робочої рідини від температури навколишнього середовища. На схемі (рис. 2) наведено графіки залежності динамічної в'язкості від температури: *1* – для силіконової або кремній-органічної рідини віскасил; *2* – для турбінного масла марки «Л»; *3* – для трансформаторного масла. Причому значення в'язкості для віскасилу занижене у 10^2 раз. Пропонується використання саме цієї рідини, що має найбільш пологу характеристику залежності в'язкості від температури. Недоліком цієї речовини є те, що вона має дещо нижчий модуль пружності – 10^5 Н/см^2. Так, наприклад,

мінеральні масла, що використовуються як робочі рідини, мають об'ємний модуль пружності від $1{,}3\cdot10^5$ до $1{,}8\cdot10^5$ Н/см^2. За законом Гука можна розрахувати величину пружного стискання рідини віскасил від дії зовнішнього навантаження. Приймемо такі характеристики демпфера:

– діаметр поршня $D = 5$ см;

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3{,}14\cdot 0{,}05^2}{4} = 0{,}00124 \text{ м}^2;$$

– товщина робочої рідини під поршнем $H = 30$ см;

– величина зовнішнього навантаження $F = 500$ Н (50 кгс)

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA} = \frac{500H\cdot 0{,}3\text{ м}}{10^9\text{ Па}\cdot 0{,}00196\text{ м}^2} =$$

$$= 7{,}65\cdot10^{-5}\text{м} = 0{,}077\text{ мм}.$$

З чого можна зробити висновок, що пружною деформацією робочої рідини можна знехтувати. Були проведені розрахунки з визначення коефіцієнта демпферного опору та приєднаної в дроселі маси для різних температур зовнішнього середовища та різних радіусів поршня. Радіус дроселя, довжина дроселя та густина рідини не змінювалися. В табл. 1 зведені дані, за якими проводилися розрахунки. Результати розрахунків зведені в табл. 2.

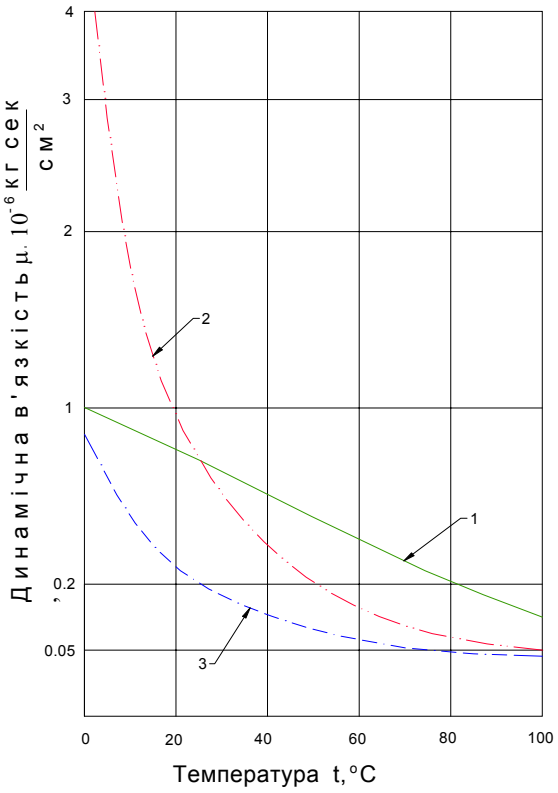


Рис. 2. Залежність в'язкості від температури для деяких рідин, що застосовуються в гідродемпферах

Таблиця 1

Початкові характеристики

Динамічна вя'зкість рідини μ , кг сек/см^2	Довжина дроселя L , см	Радіус дроселя r , см	Радіус поршня R , см	Густина рідини, кг/м^3
0,00007	30	0,25	5,0	0,000001
0,00007	30	0,25	5,5	0,000001
0,00007	30	0,25	6,0	0,000001
0,00007	30	0,25	6,5	0,000001
0,00007	30	0,25	7,0	0,000001
0,00007	30	0,25	7,5	0,000001
0,00005	30	0,25	5,0	0,000001
0,00005	30	0,25	5,5	0,000001
0,00005	30	0,25	6,0	0,000001
0,00005	30	0,25	6,5	0,000001
0,00005	30	0,25	7,0	0,000001
0,00005	30	0,25	7,5	0,000001
0,0001	30	0,25	5,0	0,000001
0,0001	30	0,25	5,5	0,000001
0,0001	30	0,25	6,0	0,000001
0,0001	30	0,25	6,5	0,000001
0,0001	30	0,25	7,0	0,000001
0,0001	30	0,25	7,5	0,000001

Таблиця 2

Вихідні характеристики

Відносна ширина демпфера Λ	Коефіцієнт демпферного опору C , кг/сек	Додаткова маса, кг	Коефіцієнт демпферного опору C , кг/сек	Додаткова маса, кг	Коефіцієнт демпферного опору C , кг/сек	Додаткова маса, кг
1	2	3	4	5	6	7
20	8444,601053	1,256637061	6031,857895	1,256637061	12063,715790	1,256637061
22	12363,740400	1,839842322	8831,243144	1,839842322	17662,486290	1,839842322
24	17510,724740	2,605762611	12507,660530	2,605762611	25015,321060	2,605762611
26	24118,625070	3,589081111	17227,589330	3,589081111	34455,178670	3,589081111
28	32440,779400	4,827496935	23171,985290	4,827496935	46343,970580	4,827496935
30	42750,792830	6,361725124	30536,280590	6,361725124	61072,561190	6,361725124

Дані результати зручно використовувати для проектування гідродемпферів. Визначити тенденції зміни робочих характеристик можна за графіком залежності коефіцієнта демпферного опору від температури та від діаметру поршня (рис. 3).

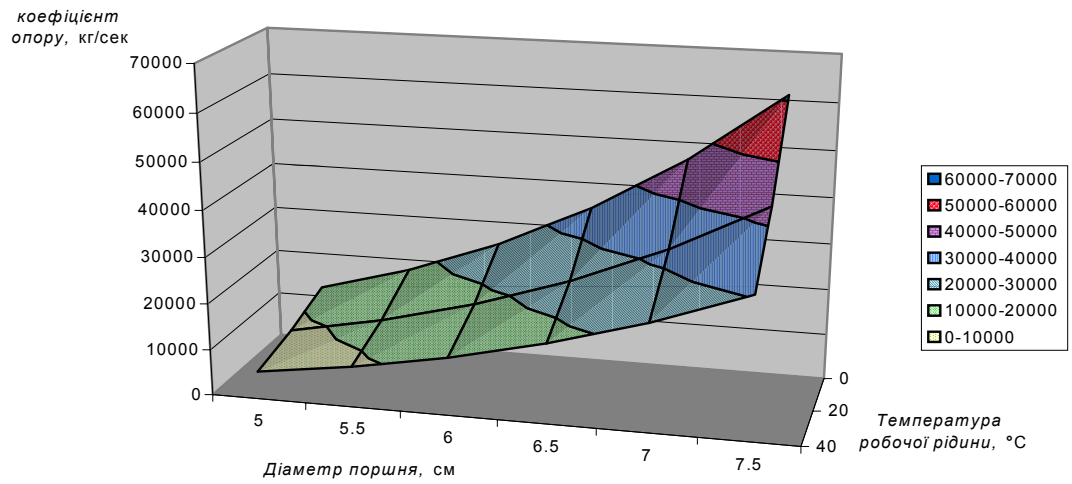


Рис. 3. Зміна коефіцієнта опору демпфера для рідини віскасил

Аналізуючи даний графік, можна сказати, що коефіцієнт опору демпфера суттєво залежить від температури. Тому при визначенні оптимального коефіцієнта опору не зовсім коректно визначати одне конкретне число. Правильніше буде сказати про оптимальний діапазон, в якому повинен знаходитися даний коефіцієнт. Однак при зменшенні діаметру поршня залежність коефіцієнта опору від в'язкості робочої суміші зменшується, що може виявитися корисним. Крім цього з результатів розрахунків можна зробити висновок, що вплив додаткової маси виявився несуттєвим, оскільки маса прогінної будови більша на декілька порядків.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Закора А. Л., Казакевич М. И. Гашение колебаний мостовых конструкций / Под ред. Н. Г. Бондаря – М.: Транспорт, 1983. – 134 с.
2. Zacora O., Marochka V. Damping of oscillations of split span constructions of bridges // Proceedings of the 2nd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Engineering. Published University of Zilina.
3. Сергеев С. И. Демпфирование механических колебаний. – М.: Физматгиз, 1959.

Надійшла до редколегії 16.10.03.

УДК 624.191.8.042/.044

В. И. ПЕТРЕНКО (ОАО «Киевметрострой»), В. Д. ПЕТРЕНКО, А. Л. ТЮТЬКИН (ДИИТ)

ПРИМЕНЕНИЕ «ФИЛЬТРОВ» ДЛЯ УГЛУБЛЕННОГО АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ «КРЕПЬ-МАССИВ» В РАСЧЕТАХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

У представленій статті наводиться модернізація процесу розрахунку методом скінченних елементів за допомогою прийому «фільтрування». Викладено алгоритм та надані види «фільтрів», які дозволяють отримувати обширну й чітко побудовану інформацію на підставі результатів розрахунку професійних розрахункових комплексів.

В представленной статье приводится модернизация процесса расчета методом конечных элементов с помощью приема «фильтрования». Изложен алгоритм и даны виды «фильтров», которые позволяют получать обширную и четко выстроенную информацию на основе результатов расчета профессиональных расчетных комплексов.

The modernization of account process by a finite elements method with the help of reception of «filtering» is resulted in submitted article. The algorithm and the kinds of «filters» are given which allow receiving more extensive and precisely built information on the results basis of professional settlement complexes account is stated.

В сложившейся ситуации исследования подземных сооружений отчетливо выделилась тенденция тяготения от аналитических методов расчета к численным [1–4]. Данная тенденция обусловлена рядом объективных причин, в том числе обстоятельной проработанностью численных методов исследования (конечных элементов, граничных элементов, их гибридов, начальных параметров, конечных разностей, дискретных элементов) и, что самое важное, внедрением их в реальные исследования путем разработки множества расчетных комплексов различного класса (ANSYS, SCAD, PLAXIS, Zenit, Lira, «Мираж» и т. д.). Легитимность численных методов также косвенно была подтверждена тем количеством решений разнообразного типа задач, которые сложно или даже невозможно решить с помощью аналитических методов [3; 5; 6]. Но, несомненно, применение численных методов – не панацея, и авторы данной статьи усматривают в широком их применении с разработкой на ПЭВМ некоторый отрицательный опыт, а именно – сведение общих теоретических знаний до уровня придатка практических или даже механических действий, нивелирования общих знаний вопроса или даже активного их незнания, профанации теоретических исследований или даже негативного отношения к ним, как к непрагматическим знаниям, знаниям неважным и ненужным.

Конечно же, точка зрения авторов не является консервативной, т. к. рассмотрено лишь два полюса использования расчетных комплексов – осмысленный и неосмысленный. Известно, что мировая практика давно базируется на исследованиях численными методами, с чем нельзя не считаться [5; 7], но два полюса отношения к ним также существуют и процветающая западная практика неосмысленного отношения к расчетам, как к механическому действию, постепенно занимает позиции повсеместно.

В связи с вышеизложенным, следует рассмотреть практические результаты, получаемые с помощью расчетных комплексов (в данном случае на основе метода конечных элементов – МКЭ), и сделать попытку расширения их интерпретации для более углубленного анализа поведения исследуемых систем.

Большинство расчетных комплексов, в основу которых входит исследование систем МКЭ, имеет возможность решения задач с упругопластическим массивом, анизотропных и/или ортотропных и макротрещиноватых массивов (МКЭ в комбинации с методом граничных элементов), упруговязким массивом на основе теории наследственной ползучести с различными видами аппроксимации функций ползучести, задач с различными видами взаимодействия крепи и массива и т. д. [1–6]. Но информация, получаемая после расчетов, независимо от класса расчетного комплекса по существу стереотипна – результаты представляют собой массивы компонент нормальных и касательных напряжений, а также линейных и угловых деформаций в узловых точках конечных элементов исследуемой модели. Трудоемкий и кропотливый анализ огромного массива данных несколько облегчается после проведе-

ния операции визуализации, т. е. построения постпроцессором комплекса линий равных величин (изолиний) различных компонент на исследуемой модели на основе печатных данных решенной задачи. Как видно из представленного, получается несколько однобокая картина исследования, свойством которой является перекос в сторону огромных усилий в построении модели (а существующие комплексы пусть и позволяют визуально отслеживать такие действия, но все равно они довольно сложны) и вводе значительного числа данных (задача усложняется, если массив и/или крепь представлять упруговязкой или упругопластической средой с возможностью реологических явлений) и довольно скупых результатов расчета. Из этого следует проблема более углубленного анализа взаимодействий в системе «крепь-массив» и нами дается один из путей ее решения. Этот путь подразумевает под собой более полное использование первичной информации (результатов расчета на ПЭВМ) реализуется в применении так называемых «фильтров».

Под «фильтром» будем понимать подпрограмму, действием которой является обработка данных расчетного комплекса неким присущим этому «фильтру» образом, целью которой является получение более обстоятельной информации, чем первичная информация расчетного комплекса. На рис. 1 авторами предлагается схема «фильтров» с кратким пояснениями их функций. Несомненно, количество «фильтров», представленных авторами, не является догмой и должно в дальнейшем увеличиваться. Количество «фильтров» должно диктоваться лишь требованиями расчетчиков-аналитиков и запросами исследователей, каких-либо системных требований к ним нет, т. к. практическая реализация может быть основана на стандартных приложениях Microsoft Office for Windows – Access, Excel или языках объектно-ориентированного программирования и др.

На рис. 2. показана схема действия «фильтра», основой которого является сравнение и выборка («фильтрование») первичных данных.

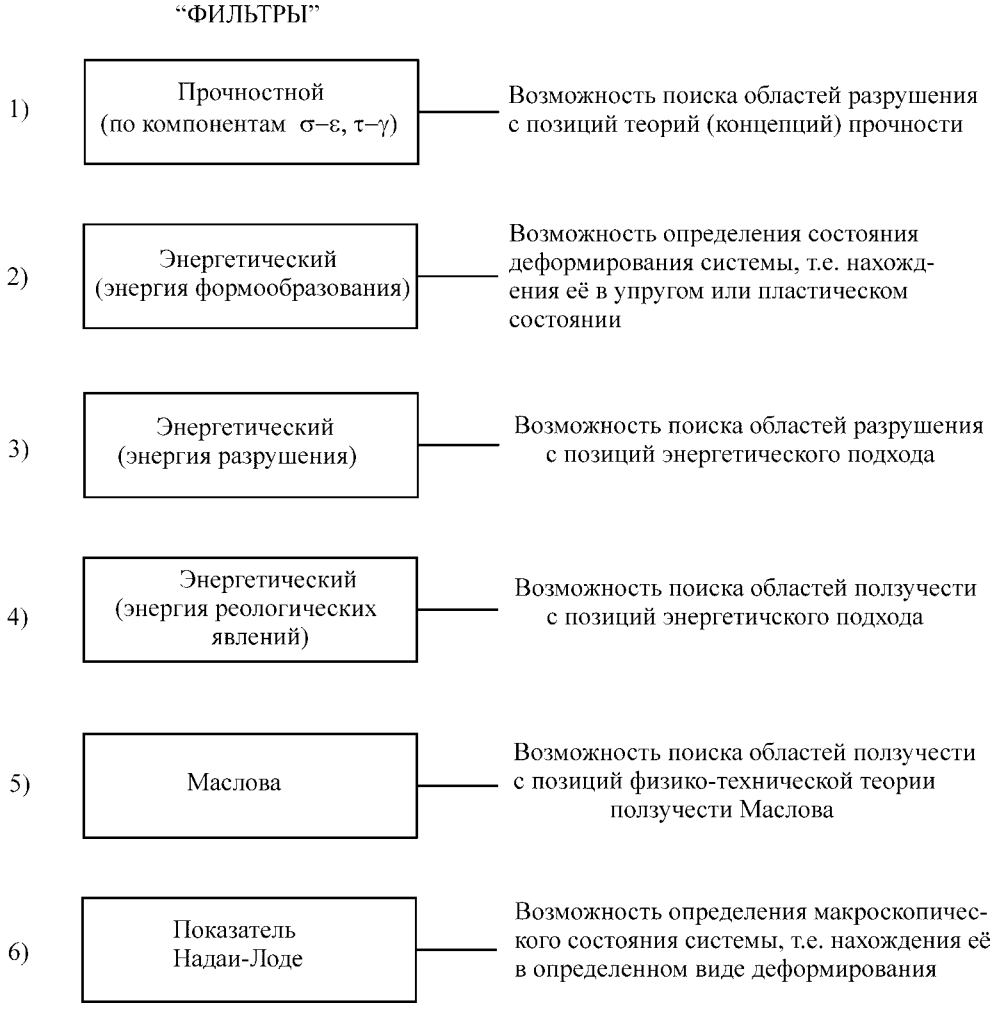


Рис. 1. Схема фильтров с кратким пояснением их действий

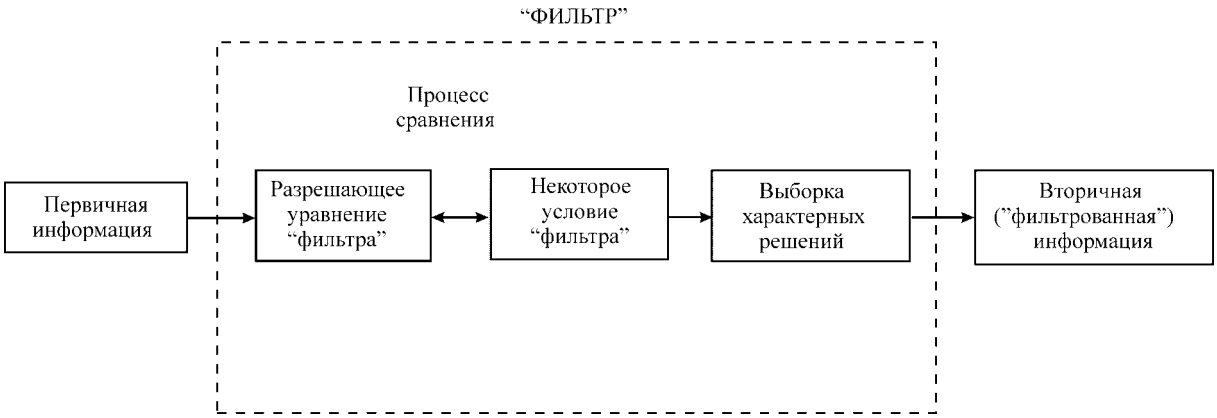


Рис. 2. Схема действия «фильтра» на основе алгоритма сравнения

Перед тем, как перейти к практической реализации «фильтрования», рассмотрим разрешающие уравнения «фильтров», представленных на рис. 1, и ту дополнительную информацию, которую они могут дать.

Разрешающим уравнением «фильтра» № 1 может являться любое уравнение теорий (концепций) прочности, применяющихся в конкретном расчете. Например, для расчетов грунтовых массивов может применяться условие прочности Кулона-Мора [8]. Из этого следует, что «профильтровав» первичную информацию расчетного комплекса (компоненты напряжений в точках) и решив разрешающее уравнение этого «фильтра», можно получить изолинии, соединяющие точки, в которых прочность достигла предельного значения. Модифицировав «фильтр» № 1, с помощью сравнения можно определять запас прочности в интересующих расчетчика точках.

Разрешающие уравнения «фильтров» № 2–4 (энергетические «фильтры») схожи, различием является лишь условие, с которым сравнивается решение уравнения. Разрешающими уравнениями являются: для «фильтра» № 2 – энергия упругопластического деформирования [8], «фильтра» № 3 – энергия разрушения [9], «фильтра» № 4 – энергия реологических явлений [8; 9]. Сравниваться решения уравнений должны с экспериментальными данными по энергии формоизменения, разрушения или реологических явлений соответственно. Нахождение значений энергии системы по известным компонентам напряжений и деформаций (полученных из расчетов МКЭ) достаточно полно приводится в работах [8; 9].

«Фильтр» № 5, разрешающим уравнением которого является уравнение физико-технической теории ползучести Н. Н. Маслова [10], реализуется как сравнение компонент нормальных напряжений с порогом ползучести (по Маслову) и таким образом получают зоны этого реологического явления.

«Фильтр» № 6 основан на определении вида деформирования посредством определения показателя Надаи-Лоде [11] путем несложных операций с массивом компонент напряжений или деформаций.

Реализация «фильтрования» первичной информации может быть решена в двух направлениях. Первое направление – для программистов и разработчиков расчетных комплексов, которые могут реализовать систему «фильтров» в средах программирования, в которых созданы эти комплексы, т. е. возможно внедрение «фильтрации» в стандартные исследовательские комплексы. Второе направление – для обычных пользователей Microsoft Office for Windows, которые недостаточно квалифицированы в программировании. Для них предлагается алгоритм «фильтрования» на основе предложенных «фильтров» (рис. 3).

Вербально можно описать алгоритм так:

1. После получения результатов, из расчетного комплекса массив данных о компонентах напряжений и деформаций экспортируется в Microsoft Excel.

2. В Microsoft Excel информация упорядочивается и производится расчет разрешающего уравнения «фильтра» по данным расчетного комплекса.

3. Массивы результатов разрешающих уравнений из Microsoft Excel направляются в Microsoft Access или в программу, которая базируется на цикле отбора IF…THEN (Visual Basic и др.), где происходит собственно процесс «фильтрования» как сравнения частей разрешающего уравнения «фильтра».

4. Полученные результаты экспортируются в Microsoft Excel, где производится углубленный анализ вторичной информации с построением графиков, диаграмм и т. д.

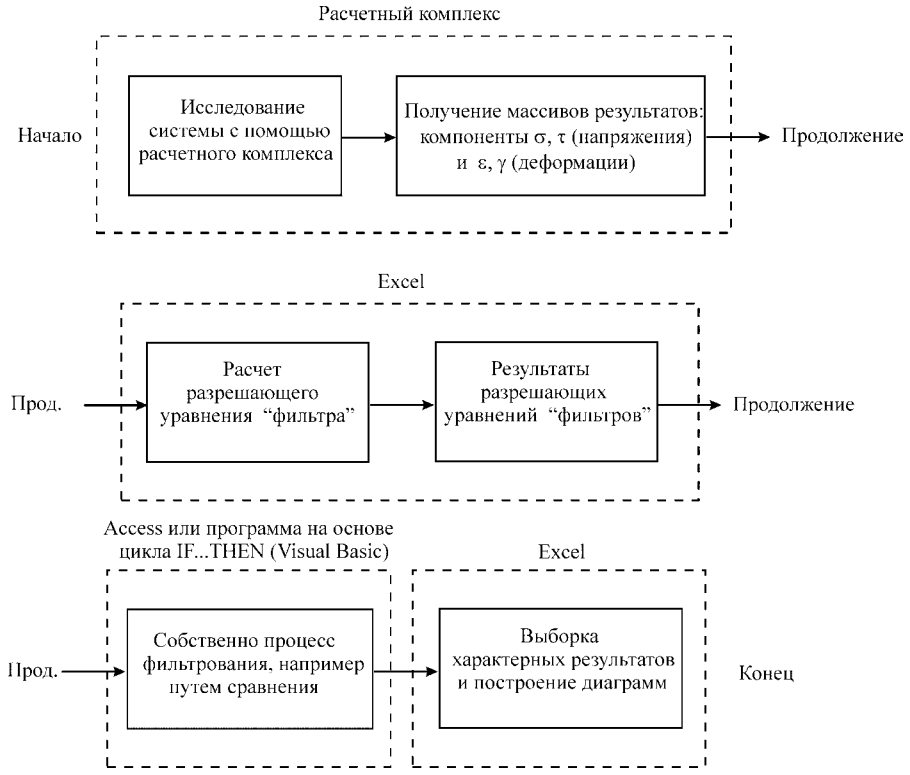


Рис. 3. Алгоритм «фильтрования»

Представленный способ и алгоритм углубленного анализа с помощью «фильтров» является попыткой более осмысленного и осознанного подхода к исследованиям подземных сооружений с помощью численных методов, реализованных в расчетных комплексах на ПЭВМ. Такой подход дает возможность отслеживания творческого изменения или коррекции расчета фундамента для более сложных построений в области компьютерных технологий и механики подземных сооружений. Причем при взвешенном отношении к ним, эти две области должны существовать как симбиоз, а не превалировать друг над другом, и именно такое слияние и есть залог новых достижений в этих областях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юркевич П. Геомеханические модели в современном строительстве // Подземное пространство мира. – № 1–2. – 1996. – С. 10–31.
2. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П. Расчет несущих элементов подземных сооружений. – К.: Наукова думка, 2001. – 168 с.
3. Современные методы прочностных расчетов в метро- и тоннелестроении / Демешко Е. А., Косицын С. Б., Сергеев В. К. и др. // Подземное строительство России на рубеже XXI века: Научно-техн. конф.: Сб. тр. 15–16 марта 2000. – М.: ТАР, 2000. – С. 200–207.
4. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики / Новикова Л. В., Пономаренко П. И., Приходько В. В., Морозов И. Т. – Д.: Наука и образование, 1997. – 180 с.
5. Метод суперэлементов в расчете инженерных соо ужений / В. А. Постнов, С. А. Дмитриев, Б. К. Емышев, А. А. Родионов. – Л.: Судостроение, 1989. – 288 с.
6. Основы метода конечных элементов / Большаков В. И., Яценко Е. А., Соссу Г., и др. – Д.: ПГАСА, 2000. – 255 с.
7. Метод конечных элементов в статике сооружений: Пер. с польск. / Шмельтер Я., Дацко М., Доброчинский С., Вечорек М. – М.: Стройиздат, 1984. – 220 с.
8. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высшая шк., 1978. – 447 с.
9. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1971. – 368 с.
10. Маслов Н. Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1984. – 176 с.
11. Зорин А. Н., Халимендик Ю. М., Колесников В. Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 413 с.

Поступила в редколлегию 02.03.03

УДК 666.97:69.059.25

О. М. ПШІНЬКО, О. В. ГРОМОВА (ДІІТ)

БЕТОНИ З ПІДВИЩЕНИМИ АДГЕЗІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ РЕМОНТУ ШТУЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

У статті викладені основи розробки та практичні дослідження властивостей бетонів на активованій в'яжучій речовині для ремонту і захисту бетонів транспортних споруд у підводній зоні з метою подовження терміну їх служби. Встановлено вплив параметрів високоінтенсивної гідравлічної активації цементної системи на технічні показники бетонної суміші, фізичні та механічні властивості бетону і контактної зони.

В статье представлены основы разработки и практические исследования свойств бетонов на активированном вяжущем веществе для ремонта и защиты бетонов транспортных сооружений в подводной зоне с целью продления срока их службы. Установлено влияние параметров высокоинтенсивной гидравлической активации цементной системы на технические показатели бетонной смеси, физические и механические свойства бетона и контактной зоны.

The article presents the fundamentals of development and practical studies of the properties of concretes, based on an activated astringent, for the repair and protection of the concretes of transport structures in the underwater zone, with a view of prolonging their service term. Established is the influence of cement system highly-intensive hydraulic activation parameters on technical performances of the concrete mixture, the physical and mechanical properties of concrete and the contact area.

Довговічність бетону транспортних споруд та відновлених елементів залежить від ряду факторів, характер яких обумовлений, з одного боку, технічною якістю проектних рішень та організацією проведення будівельних та ремонтних робіт, з іншого боку, умовами експлуатації, за яких виникає передчасне руйнування масиву бетону споруди та відновлених елементів, а також зниження їх несучої здатності. Ці руйнації пов'язані з агресивним впливом навколишнього середовища та надмірних динамічних навантажень. Тому найбільшим руйнівним впливам піддаються елементи споруд, які експлуатуються у складних гідрогеологічних умовах, під водою. Пошкодження у цій зоні пов'язані з порушенням цільності бетону і відновлених елементів при агресивному впливі води складного хімічного складу, яка діє у визначеному динамічному режимі, і є найбільш небезпечними і важко усуваються.

У зв'язку з цим значна частина транспортних споруд, що експлуатуються, потребує капітального ремонту і захисту з метою продовження терміну їх служби. Тому усунення руйнацій, які прогресують на стадії виявлення, потребує прийняття радикальних заходів з вибору сумісних до старого бетону матеріалів для ремонту і засобів відновлення монолітності споруд.

Комплексна оцінка технічного стану транспортних споруд дозволила виділити характерні види і причини порушення цілісності транспортних споруд і їх елементів та призначити ефективні матеріали і засоби для видалення дефектів. При цьому основним критерієм якості ремонтних робіт є міцне і довговічне зчеплення ремонтного матеріалу з бетонною основою та їх сумісність.

Із проблемою зчеплення нового бетону зі старим будівельники зіткнулися в перші ж роки зведення бетонних і залізобетонних споруд. Серйозного наукового дослідження це питання набуло з 20-х років нашого сторіччя у працях вітчизняних та закордонних вчених А. П. Васильєва, Ц. Г. Гінзбурга, С. О. Дмитрієва, Л. А. Ігоніна, Є. В. Лавріновича, А. Лосьє, В. М. Мікульського, І. А. Савримовича, М. Б. Урьєва [1], М. С. Хуторянського, Р. Фере, Р. Г. Девіса, Н. Леві, К. Хагера, Е. Ненінга та ін. Значний вклад у розвиток напрямку технології ремонтних робіт з питань підвищення якості ремонту (зчеплення і сумісності ремонтного матеріалу зі старою поверхнею) внесли наукові дослідні праці сучасних фахівців В.О. Вознесенського, Є. Г. Годеса, В. І. Дмитревського, П. В. Кривенка, С. М. Курочкіна, О. М. Пшінько [2], Н. М. Руденко [2], Р. В. Рунової, В. Л. Чернявського, Д. Р. Моргана, Е. Н., Емберсона, Г. К. Мейса, В. Вілкінсона, М. Пегіона, М. Марозеки та ін.

Аналіз фізико-хімічної природи і умов формування якісного контактного шару обумовили спеціальні вимоги до ремонтного матеріалу і технології проведення ремонтних робіт, які забезпечують цілісність бетону споруди і сумісну роботу матеріалів при складних умовах експлу-

атації. Доведено, що цементні бетони традиційної технології приготування для ремонту бетону у підводній зоні малоефективні і недовговічні через комплекс експлуатаційних впливів. Для вирішення поставленої задачі треба використовувати комплексний підхід, з урахуванням властивостей бетону основи – старого бетону, для оптимізації фізико-механічних і адгезійних характеристик нового бетону для їх довговічної сумісної роботи.

Аналіз літературних джерел і попередні експерименти показали, що для вирішення проблеми найбільш ефективним для якісного ремонту є використання попередньої високоінтенсивної гідравлічної активації цементної системи бетонів, яка забезпечує поліпшення технологічних властивостей бетонних сумішей і підвищені фізико-механічні та експлуатаційні показники. Фізико-хімічна єдність матеріалів та висока проникліва спроможність активованого цементного тіста у пори, тріщини і пустоти старого бетону забезпечує якісне та довговічне зчеплення при відносній дешевизні і недефіцитності вихідних матеріалів.

Авторами проведено вибір вихідних матеріалів. Визначено основні фізико-механічні та технологічні характеристики ремонтного матеріалу на активованому в'яжучому і без активації. Спеціально розроблена методика визначення величини зчеплення нового бетону зі старим на відрив.

Доведено, що якість зчеплення визначається сумісністю роботи основного шару з ремонтним. Цьому питанню було приділено особливу увагу. Для прогнозування та оптимізації цієї важливої характеристики було обрано метод скінченноелементного аналізу, який реалізується за допомогою сучасного програмного забезпечення «ANSYS 5.6-5.7».

На підставі виконаних досліджень розроблені геометрична і скінченноелементна моделі тришарового елементу і доведена адекватність оцінки контактної міцності на відрив технологічним умовам. Структура контактного шару складається з трьох складових: *1* – старий бетон; *2* – ремонтний бетон; *3* – контактний (проміжний) шар (товщиною 20…70 мкм).

Шляхом заміни контактного шару пружними вставками і поступового їх видалення вдалося змоделювати процес тріщиноутворення та руйнування контактної зони. При порівнянні дослідних даних з розрахунковими розглядалися поле осьової напруги, поле максимальної головної напруги, поле інтенсивності та поле продольних деформацій. Достовірність отриманих даних та їх відхилення від дослідних знаходяться в межах 8 %. Це свідчить про достатню адекватність отриманих моделей. У результаті досліджень одержана серія комп'ютерних рисунків, на основі аналізу яких встановлено, що прикладення напруги має локалізований характер (принцип Сен-Венана). При збільшенні напруги від місця прикладення стрижня вона поступово передається до сусідніх ділянок контактної зони. Деформації у контактній зоні зростають пропорційно приросту напруги до визначеної межі, коли не спостерігається зростання деформацій. У залежності від складу ремонтного бетону максимальна напруга в контактній зоні складає 4,5…6,5 МПа; ці значення напруги зафіксовано як руйнівні за реальних умов випробувань. У цьому випадку виникає гирло тріщини, яке спостерігається при видаленні половини пружних зв'язків по контуру від місця прикладення напруги у площині контакту ($r = 1,75\ldots2$ см); за реальних умов випробувань у цей момент відбувається миттєва руйнація контакту.

Контроль якості зчеплення здійснюється відносно місця відриву, з найслабкішою ланкою у ланцюгу, тобто у випадку впливу на відновлену конструкцію надмірної напруги та агресивного середовища руйнування відбудеться у бетоні основи чи у ремонтному шарі, а може і у зоні контакту цих двох шарів, в залежності від того, в якій площині знаходиться елемент з найменшою здатністю витримувати прикладені напруги. У лабораторних умовах розрізняють чотири типи характерних видів руйнацій при випробуванні на відрив: *1* – когезійне по ремонтному матеріалу; *2* – когезійне по старому бетону; *3* – чисто адгезійне; *4* – змішане. Перші два характеризують якість матеріалів та технологію ремонтних робіт, типи *3–4* – адгезійні здібності ремонтного бетону. При оптимізації зчеплення з використанням у якості ремонтних матеріалів бетонів на активованій в'яжучій речовині спостерігається руйнування частково в межах трьох зон (складових) – змішане: такий тип руйнування вважається оптимальним для досягнення довговічності контакту та адгезійної міцності, тобто міцність при вигині та на відрив контактного шару наближається до міцності старого бетону.

Для якісного ремонту використовувався комплексний підхід. Ремонтна система з трьох складових розглядалася як цілісна модель, яка є сукупністю властивостей складових з урахуванням факторів, здатних вплинути на якість ремонту на стадії проектування та проведення ремонтних робіт. Тому проведено всебічний аналіз фізико-хімічної природи контактного

шару старого бетону споруд для розробки сумісних за фізико-механічними показниками бетонів з підвищеними адгезійними властивостями. Досліджено фізико-хімічні основи корозійних процесів у масиві старого бетону і контактному шарі підводної і надводної зон транспортних штучних споруд. Встановлено, що основним процесом руйнування бетону і порушення монолітності контактного шару є вплив водного середовища під напором з виносом структурного компоненту бетону – вапна. Цьому ж процесу сприяє участь продуктів метаболізму біологічних шарів у корозійному процесі старого бетону під водою. Це свідчить про необхідність підвищення непроникності ремонтного шару і контактної зони. Вважається, що частина вільного вапна (10…15 %) у цементі підлягає зв'язуванню кремнеземистим наповнювачем (10…15 % у мас. ч.) у важкорозчинні компоненти – низькоосновні гідросилікати кальцію.

Досліджено хімічний склад продуктів руйнації поверхневого шару старого бетону, який під водою характеризується підвищеним вмістом карбонатів, бактерій, органічних і мінеральних кислот та продуктів їх метаболізму, в надводній зоні привалюючим є процес карбонізації поверхні. Крім того, інтенсивність процесу руйнації та достатня проникність цементного тіста у пори і порожнини старого бетону залежить від його пористості. Дослідження показали, що поровий простір лабораторних зразків становить 20 мкм, водопоглинання – 7,5 %. Тому запропоновано проводити оптимізацію дисперсності цементного в'яжучого за критерієм заповнюваності пор, який є одним з умов міцного та довговічного зчеплення

$$D_{\text{п}} \geq 2d_{\text{ц}},$$

або

$$\frac{d_{\text{ц}}}{D_{\text{п}}} \leq 0{,}5, \qquad (1)$$

де $D_{\text{п}}$ – середній діаметр пор на поверхні старого бетону, мкм; $d_{\text{ц}}$ – розмір цементних часток ремонтного бетону, мкм.

Крім структурних характеристик старого бетону, на зчеплення нового бетону зі старою кладкою впливає вік та якість поверхні старого бетону. Вплив віку старого бетону на формування контактної міцності значний до одержання бетоном 70…100 % проектної міцності, надалі вплив цього фактора незначний.

Необхідною умовою надійного зчеплення є повнота контакту нового бетону з поверхнею старого бетону. Тому на міцність зчеплення впливають фактори поверхні старого бетону: пори, порожнини, виступи, впадини, нерівності, які залежать від інтенсивності взаємодії старого бетону з навколишнім середовищем та різних видів підготовки поверхні до ремонту. Чим більше шорсткість поверхні, тим більше її активних центрів вступає у контакт з цементним тістом ремонтного бетону і зростає адгезія. Контроль стану поверхні здійснюється шляхом визначення середньої висоти Δ елементів нерівностей бетонної поверхні. Оцінка якості поверхні відбувається за еталонами шорсткості.

Проведено аналіз різних засобів підвищення адгезійної здібності цементного тіста нового бетону. Встановлені підвищення технологічних властивостей бетонної суміші та інтенсифікація процесів гідратації та структуроутворення при гідравлічному способі активації в'яжучої речовини. Розроблено і досліджено фізико-механічні й експлуатаційні властивості бетонів на активованій в'яжучій речовині і контактного шару. Встановлено істотне підвищення зчеплення і когезійної міцності при гідравлічної активації цементної системи (рис. 1, 2). Вказаний ефект доповнюється введенням у процесі активації в суміш органо-мінерального комплексу (ОМК), варіюванням вмісту активованого компоненту у бетонній суміші і параметрів активації. Сутність високоінтенсивної гідравлічної активації полягає у диспергації цементних часток від 20…50 до 4…10 мкм, розщепленні довголанцюгових комплексів пластифікатора і зміні морфології складу цементної системи за 5…7 хв при зіткненні взаємозатоплюваних гідравлічних потоків у спеціальному реакторі-активаторі з інтенсивністю акивації 40…50 м/с, яка в 6…7 раз більша первинної.

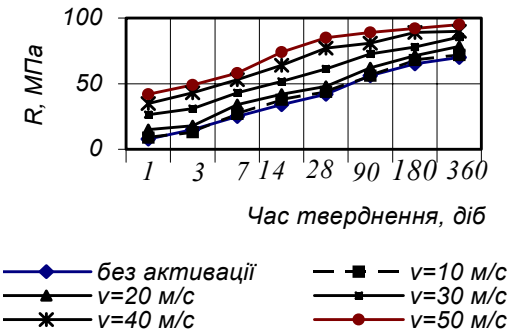


Рис. 1. Кінетика росту когезійної міцності цементного каменю різного ступеня активації

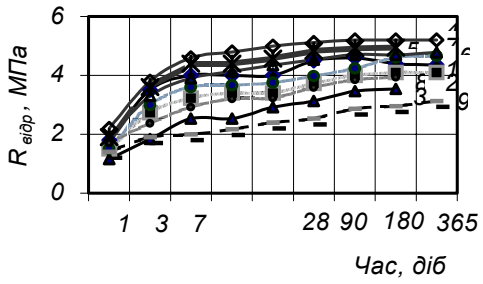


Рис. 2. Кінетика росту міцності зчеплення у часі в залежності від В/Ц цементного тіста та дисперсності цементу ($м^2/г$):
1 – S=700, В/Ц=0,3; *2* – S=500, В/Ц=0,3; *3* – S=300, В/Ц=0,3; *4* – S=700, В/Ц=0,4; *5* – S=500, В/Ц=0,4; *6* – S=300, В/Ц=0,4; *7* – S=700, В/Ц=0,5; *8* – S=500, В/Ц=0,5; *9* – S=300, В/Ц=0,5

Встановлено, що проникність цементного тіста в пори старого бетону зростає при дисперсності твердої фази $S_{уд} = 500$ $см^2/г$, яка характеризується переважно розміром часток 4…9 мкм при інтенсивності активації 40…50 м/с (табл. 1) і терміну активації 6…7 хв. При збільшенні часу активації кількість дисперсної фази зростає з одночасним збільшенням нормальної густини і активності цементу, потім частки цементу агрегатуються у більш крупні, що призводить до підвищення в'язкості цементної системи і зменшення зчеплення.

Таблиця 1

Зміна гранулометричного складу цементу в залежності від параметрів активації

Інтенсивність активації, м/с	Гранулометричний склад цементного в'яжучого, $d_ц$ мкм, %				
	< 5	5…10	10…20	20…40	> 4
Без активації	5	10	20…25	30..35	25
20	10	15…20	20…30	20	15…20
30	15…20	25	25	20	10…15
40	20	40	30	5…10	5
50	20…25	25…35	30…35	15	10

Недостатня кількість цементного тіста в зоні контакту зменшує величину зчеплення через низьку клейку дію цементного тіста бетону жорсткої консистенції. Тому при переході від литої бетонної суміші (ОК = 20…21 см) до пластичної ОК = 10…14 см (із відповідним ростом когезійної міцності ремонтного бетону) міцність зчеплення зменшується (рис. 3). Таким чином, існує оптимальне водоцементне відношення для досягнення необхідної когезійної і адгезійної міцності, яке дорівнює 0,45…0,5 (рис. 4).

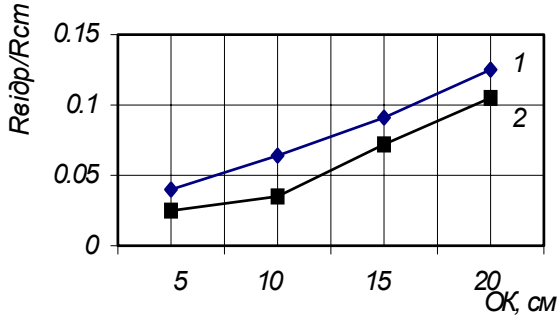


Рис. 3. Залежність відносної міцності зчеплення від консистенції ремонтного бетону і гігроскопічності поверхні старого бетону:
1 – у воді; *2* – волога поверхня

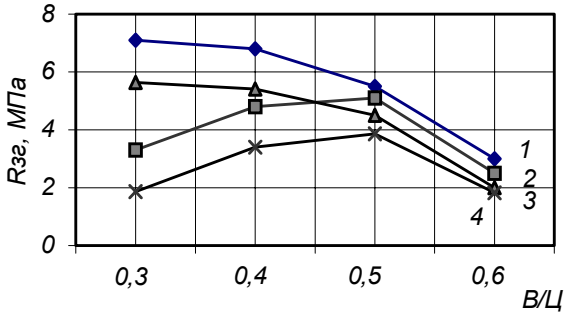


Рис. 4. Залежність когезійної та адгезійної міцності ремонтного бетону від В/Ц:
1 – когезійна міцність бетону без активації; *2* – адгезійна міцність бетону без активації; *3* – когезійна міцність бетону після активації; *4* – адгезійна міцність бетону після активації

Позитивна дія сумісної гідромеханічної активації цементної системи з хімічною взаємодією ОМК для якісного проведення ремонтних робіт під водою виражена також у зменшенні в'язкості з підвищенням інтенсивності активації до 40…50 м/с, підвищенням пластичності, текучості 25…35 с і зв'язності цементної системи, яка характеризується водовідділенням у межах $\Delta B = 1,2…1,7\,\%$. Коефіцієнт зберігання рухливості для ремонтних бетонів на активованому в'яжучому знаходиться в межах $K = 1,10…1,5$.

Виконано дослідження пористості ремонтного бетону і контактної зони оптимальних режимів активації..

Встановлено, що структура активованого цементного каменю відзначається низькою пористістю (на 6…8 % менша в порівнянні з бетоном традиційного виготовлення) і непроникністю завдяки зменшенню середнього радіуса пор при збільшенні об'єму продуктів гідратації.

Незалежно від тепловологісних умов експлуатації та стану поверхні міцність зчеплення бетону на активованому в'яжучому у порівнянні зі звичайним бетоном перевищує у віці три доби – у 3,1…3,4 рази, а у віці 28 діб – у три рази (табл. 2).

Таблиця 2

Міцність зчеплення нового бетону з поверхнею, що ремонтується

Умови твердн.	Вік зразків, діб	Міцність на відрив, МПа			
		звичайного бетону з поверхнею		бетону на активованому в'яжучому з поверхнею	
		природною	очищеною	природною	очищеною
20±2 °С	3	0,42	0,64	1,20	1,45
	7	0,64	0,75	1,89	2,31
	28	1,81	2,12	3,44	5,14
+25 °С	3	0,66	0,75	1,89	2,76
	7	0,84	0,97	2,65	3,45
	28	1,84	2,13	3,89	4,75
+5 °С	3	0,52	0,73	1,30	1,70
	7	0,64	0,93	2,04	2,87
	28	1,93	2,50	3,23	4,19
У воді	3	0,96	0,98	1,94	2,30
	7	1,45	1,58	2,84	4,23
	28	2,31	2,63	4,79	5,84

Встановлено, що введення ОМК у склад цементної системи дозволяє знизити величину деформацій до рівня значень основного бетону підводної зони, тому цементний камінь контактної зони і ремонтного шару буде однаково з основним бетоном реагувати на зміни умов експлуатації.

Виконані дослідження фізико-механічних властивостей старого і ремонтного бетону дозволили одержати критерій сумісної роботи матеріалів і прогнозувати властивості контактної зони при різних умовах експлуатації. Встановлено, що для довговічної сумісної роботи ремонтного і основного бетонів когезійна міцність ремонтного бетону повинна дорівнювати чи бути більше міцності основного бетону, модуль пружності контактної зони та ремонтного бетону повинен бути трохи меншим чи дорівнювати модулю пружності основного бетону $E_{\text{с}}^{\text{б}} \geq E_{\text{к}} \geq E_{\text{н}}^{\text{б}}$.

Підвищення стійкості ремонтного шару на активованій в'яжучій речовині у різних середовищах забезпечується за рахунок зниження вмісту вільного вапна у цементному камені та зв'язування його у низькоосновні гідросилікати кальцію. Коефіцієнт сульфатостійкості для бетонів на активованому в'яжучому знаходиться у межах 0,86…0,91.

Випробуваннями на водонепроникність ремонтного бетону встановлено, що бетон на активованій в'яжучій речовині відповідає марці за водонепроникністю $W8…12$.

За результатами проведених досліджень можна відзначити, що ремонтному шару на активованій в'яжучій речовині у специфічних умовах експлуатації гарантована висока довговічність. Встановлено, що розроблені бетони можна кваліфікувати як матеріал з підвищеними експлуатаційними та адгезійними властивостями для ремонту і захисту транспортних споруд у підводній зоні.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Урьев Н. Б., Михайлов Н. В. Коллоидный цементный клей и его применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1967. – 175 с.
2. Пшинько А. Н., Руденко Н. Н. Особенности ремонта искусственных транспортных сооружений // Залізничний транспорт України. – 2001. № 2. – С. 14–16.

Надійшла до редколегії 22.11.03.

УДК 627:691.175-404.5

А. Н. ПШИНЬКО, А. В. КРАСНЮК, Е. С. ХАРЧЕНКО (ДИИТ)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ КАРБАМИДНЫХ СМОЛ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

У статті наведено результати досліджень з визначення реологічних та міцностних властивостей полімерних розчинів на основі карбамідних смол. Отримано моделі, які відображають реологічні та міцностні властивості матеріалів. Визначені оптимальні склади для проведення відновлювальних робіт бетонних транспортних гідротехнічних споруд.

В статье приведены результаты исследований по определению реологических и прочностных свойств полимерных растворов на основе карбамидных смол. Получены модели, отражающие реологические и прочностные свойства материалов. Определены оптимальные составы для проведения восстановительных работ бетонных транспортных гидротехнических сооружений.

The article presents the results of research on determination of rheological and strength characteristics of polymer mortars, based on carbamide resins. The models have been obtained, reflecting rheological and strengths properties of the material. The optimal compositions have been determined for performance of reconstruction works of concrete-based hydro-technical transport structures.

Воздействия природных и антропогенных агрессивных факторов становятся причинами разрушения, снижения долговечности и несущей способности искусственных транспортных гидротехнических сооружений. Попеременное увлажнение и высыхание, замораживание и оттаивание, механические воздействия льдов, химические и биологические воздействия являются основными причинами разрушения бетона гидротехнических сооружений. Истирание приводит к механическому разрушению бетона. Смачивание бетона приводит к его набуханию, а высыхание к усадке – это является причиной появления микротрещин в бетоне с последующим их увеличением. Замерзание воды в порах бетона, сопровождается повышением ее объема на 9 %. В результате этого происходит заполнение свободных пор бетона, а остальная замерзшая вода вызывает разрушение структуры бетона. Кроме всего перечисленного, бетон в этой зоне подвержен вымыванию свободной извести из цементного камня, воздействию агрессивных веществ, растворенных в воде и воздухе, а также разрушающему воздействию продуктов жизнедеятельности биологических обрастаний. Разрушение бетона в зоне переменного уровня воды начинается с шелушения бетонной поверхности и отслоения растворной составляющей бетона. Потом разрушения углубляются в тело бетона, способствуя образованию каверн диаметром до 3–4 см и глубиной 0,7…1,5 см с последующим увеличением их диаметра до 15…25 см и глубиной до 20 см. Отдельные каверны, соединяясь, образуют поясообразные ниши, глубина которых может достигнуть в отдельных случаях 30…35 см [1–3].

Как показывает опыт, использование традиционных цементных растворов для ремонта транспортных гидротехнических сооружений малоэффективно. Отремонтированные цементными растворами конструкции из-за комплекса приведенных выше воздействий недолговечны. Материал для ремонта гидротехнических сооружений должен иметь: высокие показатели по прочности и стираемости, водонепроницаемости, морозостойкости, биостойкости, коррозионной стойкости; обеспечивать высокое сцепление с поверхностью старого бетона. Ряд проведенных исследований показывает, что полимерные растворы (фурановые, эпоксидные, фенолоформальдегидные, полиэфирные, карбамидные и др.) наилучшим образом удовлетворяют этому комплексу требований [2; 3].

Для применения в различных регионах Украины наибольший интерес представляют карбамидные смолы, так как они дешевле, малотоксичны (применяются в мебельной промышленности) и производятся в Украине. При этом по своим физико-механическим характеристикам не уступают другим видам полимеров.

С целью разработки полимерных растворов на основе карбамидных смол для восстановле-

ния бетонных элементов транспортных гидротехнических сооружений были проведены исследования реологических свойств карбамидных полимерных растворов и прочностных свойств полимерного камня.

При ремонте бетонных транспортных сооружений в зоне переменного уровня воды важно, чтобы полимеррастворные ремонтные смеси имели заданные характеристики по подвижности и срокам полимеризации. Для проектирования полимеррастворных смесей заданных свойств были проведены планированные эксперименты, в которых варьировались факторы приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Варьируемые факторы первого планированного эксперимента

Уровни	Смола КФ–МТ–15, кг/м^3	Отвердитель $C_2H_2O_4$, кг/м^3	Наполнитель ПГПФ, кг/м^3
–1	500	35	0
0	600	70	75
+1	700	105	150

Готовились полимеррастворные смеси, на которых определялись подвижность и сроки их полимеризации, по специально разработанным методикам. На основании экспериментальных данных были рассчитаны параметры принятой модели, отражающие свойства полимеррастворной смеси по подвижности и срокам полимеризации.

Модель, отражающая подвижность полимеррастворной смеси, где в качестве отвердителя применяется 5 % раствор щавелевой кислоты $C_2H_2O_4$ имеет вид

$$П_1 = 258,93 + 27,9X_1 + 18,5X_2 - 0,4X_3 +$$
$$+0,76X_1^2 - 6,44X_2^2 - 8,54X_3^2 - 1,6X_1 \cdot X_2 -$$
$$-1,6X_1 \cdot X_3 - 1X_2 \cdot X_3 - 1,2X_1 \cdot X_2 \cdot X3,$$

где $П_1$ – подвижность полимеррастворной смеси первого планированного эксперимента, мм; X_1 – количество смолы КФ-МТ-15 в условных единицах; X_2 – количество отвердителя в условных единицах; X_3 – количество наполнителя ПГПФ в условных единицах.

Как видно из параметров модели, основным фактором, определяющим подвижность (вязкость) смеси, является содержание смолы и отвердителя.

Модель, отражающая время полимеризации полимеррарствороной смеси, где в качестве отвердителя применяется 5 % раствор щавелевой кислоты $C_2H_2O_4$ имеет вид

$$t_1 = 19,51 + 13,9X_1 - 46,7X_2 + 0,7X_3 +$$
$$+5,255X_1^2 + 28,65X_2^2 22 + 1,06X_3^2 - 12,5X_1 \cdot X_2 +$$
$$+0,5X_1 \cdot X_3 + 0,3X_2 \cdot X_3 - 0,7X_1 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

где t_1 – время полимеризации полимеррастворной смеси первого планированного эксперимента, мин; X_1, X_2, X_3 – переменные количества составляющих.

Из приведенной модели видно, что наибольшее влияние на сроки полимеризации оказывает количество отвердителя.

Сравнение экспериментальных данных с данными изолиний подвижности и сроков полимеризации, построенных по моделям, показали, что их отклонение находится в пределах 4…6 %.

Анализ приведенных данных свидетельствует о существовании зон наибольших показателей подвижности и наименьших показателей сроков полимеризации смеси, поэтому с помощью полученных моделей можно достаточно точно определить оптимальные соотношения всех трех факторов полимерного раствора.

Проведенными экспериментами установлено, что для торкретирования наиболее удобно применять полимеррастворные смеси с подвижностью эквивалентной 200…250 мм расплыва смеси на стандартном встряхивающем столе и сроками начала полимеризации более 30 мин (снижение подвижности смеси на 50 мм). На основании этого был проведен анализ графиков построенных по математическим моделям и выбраны наиболее приемлемые пределы составляющих полимерного раствора с точки зрения их ремонтной технологичности и при условии возможной экономии смолы и отвердителя.

Для определения прочностных характеристик полимерных растворов на основе карбамидных смол был также проведен планированный эксперимент. Анализ полученных данных, расчет коэффициентов математических моделей проводились по описанной выше методике с помощью ЭВМ.

В результате проведенных экспериментов были получены модели прочностных характе-

ристик полимеррастворного камня: Y_{11} – прочность на сжатие образцов в возрасте 2 сут. – водного твердения (т. е. погружены в воду сразу после полимеризации); Y_{12} – прочность на сжатие образцов в возрасте 28 сут. – водного твердения; Y_{13} – прочность на изгиб образцов в возрасте 2 сут. – водного твердения; Y_{14} – прочность на изгиб образцов в возрасте 28 сут. – водного твердения; Y_{15} – прочность на сжатие образцов в возрасте 2 сут. – твердение на суше (18…20 °С, влажность 60…70 %); Y_{16} – прочность на сжатие образцов в возрасте 28 сут. – твердение на суше; Y_{17} – прочность на изгиб образцов в возрасте 2 сут. – твердение на суше.

В результате проведенных экспериментов были получены следующие модели, отражающие прочностные характеристики полимеррастворного камня:

$$Y_{11} = 35,97 + 2,99X_1 + 7,41X_2 - 2,63X_3 - $$
$$-5,12X_1^2 - 10,78X_2^2 - 3,63X_3^2 + 0,09X_1 \cdot X_2 - $$
$$-1X_1 \cdot X_3 + 3,57\ X_2 \cdot X_3 + 0,33X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

$$Y_{12} = 40,26 + 3,94X_1 + 3,3X_2 - 1,9X_3 - $$
$$-5,28X_1^2 - 8,02X_2^2 - 4,5X_3^2 - 0,66X_1 \cdot X_2 - $$
$$-0,48X_1 \cdot X_3 + 2,58X_2 \cdot X_3 - 0,51\ X \cdot X_2 \cdot X_3;$$

$$Y_{13} = 12,96 + 1,3X_1 + 3,01X_2 - 0,76X_3 - $$
$$-2,28X_1^2 - 3,67X_2^2 - 1,67X_3^2 + 0,6\ X_1 \cdot X_2 - $$
$$-0,42X_1 \cdot X_3 + 1,13X_2 \cdot X_3 + 0,05X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

$$Y_{14} = 11,85 + 2,2X_1 + 1,48X_2 - 0,15X_3 - $$
$$-0,85X_1^2 - 1,6X_2^2 - 0,29X_3^2 + 0,25X_1 \cdot X_2 - $$
$$-0,27X_1 \cdot X_3 + 0,94X_2 \cdot X_3 - 0,03X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

$$Y_{15} = 38,76 + 3,24X_1 + 6,11X_2 - 2,23X_3 - $$
$$-4,95X_1^2 - 10,84X_2^2 - 3,78X_3^2 + 0,48\ X_1 \cdot X_2 - $$
$$-1,76X_1 \cdot X_3 + 3,22X_2 \cdot X_3 + 0,06X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

$$Y_{16} = 42,98 + 3,2X_1 - 0,77X_2 - 0,4X_3 - $$
$$-1,43X_1^2 - 2,05X_2^2 - 1,91X_3^2 - 0,08X_1 \cdot X_2 - $$
$$-0,62X_1 \cdot X_3 - 0,2X_2 \cdot X_3 + 1,74X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

$$Y_{17} = 14,25 + 1,87X_1 + 2,35X_2 - 0,96X_3 - $$
$$-2,84X_1^2 - 4,44X_2^2 - 1,57X_3^2 + 0,48X_1 \cdot X_2 - $$
$$-0,87X_1 \cdot X_3 + 0,47X_2 \cdot X_3 + 0,04X_1 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

где Y – показатель прочности полимеррастворного камня, МПа; X_1 – количество смолы в условных единицах (задается в пределах от -1 до $+1$, включительно); X_2 – количество отвердителя в условных единицах (задается в пределах от –1 до +1, включительно); X_3 – количество наполнителя в условных единицах (задается в пределах от –1 до +1, включительно).

Анализ экспериментальных данных показал, что прочностные характеристики полимеррастворного камня на основе карбамидной смолы КФ-МТ-15 зависят от вида и содержания отвердителя, количества смолы, содержания воды в растворе и условий его эксплуатации. Особенно важно, что установлены области наибольшей прочности полимерных растворов с использованием различных количеств микронаполнителя, а также различных отвердителей. При этом сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными по моделям, показало, что их расхождение составляет 4…7 %, что свидетельствует об адекватности полученных моделей. Исследованиями установлено, что прочность на сжатие полимерных растворов на основе карбамидных смол в возрасте 2 сут. составляет 20…35 МПа, возрасте 28 сут. – 30…50 МПа, а на изгиб в возрасте двух суток – 8…16 МПа.

Установленные экспериментальные факты позволяют надежно прогнозировать свойства исследуемых композиций в производстве, назначая составы требуемой прочности (марки раствора) при заданной подвижности, а также время полимеризации опытной смеси.

На основании проведенного анализа результатов экспериментов были выбраны оптимальные составы по прочностным показателям полимеррастворного камня, при этом учитывались реологические характеристики полимеррастворной смеси и дешевизна составов.

Проведенные эксперименты позволили получить достаточно полное представление о реологических и прочностных характеристиках полимеррастворной смеси и камня. Однако для того, чтобы утверждать целесообразность их применения для восстановления бетона транспортных сооружений в зоне переменного уровня воды, необходимо произвести дополнительные исследования полимеррастворного камня

в различных условиях эксплуатации, его адгезионную прочность к поверхности бетона, химическую и биостойкость и др.

В результате проведенных исследований были определены реологические свойства полимерных растворов на основе карбамидной смолы КФ-МТ-15. Установлено, что для торкретирования наиболее удобно применять полимерные растворные смеси с подвижностью эквивалентной 200…250 мм расплыва смеси на стандартном встряхивающем столе и сроками начала полимеризации более 25 мин. Оптимизированы прочностные свойства полимерного камня. Установлено, что прочностные характеристики полимеррастворного камня на основе карбамидной смолы КФ-МТ-15 зависят от вида и содержания отвердителя, количества смолы и наполнителя (ПГПФ), содержания воды в единице объема раствора и условий его эксплуатации. На основании проведенного анализа результатов экспериментов выбраны оптимальные составы по реологическим и прочностным показателям полимерных растворов. Разработаны модели, отражающие реологические и прочностные характеристики карбамидных полимерных растворов, что позволяет их оптимизировать.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Содержание, реконструкция, усиление и ремонт мостов и труб: Учебн. для студ вуз. ж-д. трансп. / Осипов В. О., Кузьмин Ю. Г., Киста А. А. и др. / Под ред. В. О. Осипова. Ю. Г. Кузьмина. – М.: Транспорт, 1996. – 471 с.
2. Пшинько А. Н. Подводное бетонирование и ремонт искусственных сооружений: Монография.– Д.: Пороги, 2000. – 411 с.
3. Соломатов В. И., Бобрышев А. Н., Химмлер Н. Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.

Поступила в редколлегию 11.01.04 р.

УДК 666.94.015.7

Н. Н. РУДЕНКО (ВНУ), Д. В. РУДЕНКО (ДИИТ), В. В. ПУНАГИН (ПГАСА)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АКТИВИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ БЕТОНА

У статті наведено результати експериментально-теоретичних досліджень впливу гіпсу на процеси структуроутворення активованої цементної матриці бетону. Показана можливість одержання бетонів з проектними експлуатаційними властивостями без застосування теплової обробки виробів.

В статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований влияния гипса на процессы структурообразования активированной цементной матрицы бетона. Показана возможность получения бетонов с проектными эксплуатационными свойствами без применения тепловой обработки изделий.

The article presents the results of experimental and theoretic research of the influence of gypsum upon processes of structure formation in the activated cement matrix of a concrete, and demonstrates a possibility of obtaining the concretes with rated performance characteristics without temperature treatment of end-items.

В настоящее время в связи с возрастающими эксплуатационными нагрузками к бетону сооружений специального назначения предъявляются повышенные требования по долговечности и стойкости в условиях действия агрессивных сред. Кроме того, современные экономические условия создают предпосылки для развития новых технологий возведения зданий и сооружений пониженной энергоемкости. В связи с этим особую актуальность приобретает технология высокопрочных бетонов, предусматривающая исключение тепловой обработки изделий и конструкций как наиболее энергоемкой технологической операции. При этом становится приоритетным исследование механизма ускорения твердения бетона с образованием упорядоченной пространственной структуры его цементной матрицы. В исследованиях ставится задача обеспечения 70 % прочности бетона нормального твердения уже в двухсуточном возрасте.

Поставленные задачи могут быть решены при введении в состав бетонной смеси активированной цементной системы, поскольку, как показали проведенные исследования, цементная система, подвергнутая физико-химической активации с введением химически активных компонентов, способна обеспечить требуемые проектные характеристики бетонов специального назначения.

При исследовании особенностей процессов гидратации и структурообразования активированных цементных систем установлена ведущая роль гидросульфоалюминатных новообразований при формировании пространственной структуры цементной матрицы бетона. Поэтому проведены исследования влияния различного количества сульфата кальция на процессы гидратации активированной цементной системы, поскольку гидросульфоалюминаты кальция являются наименее стабильными новообразованиями в цементном камне, а их фазовые превращения способствуют возникновению напряжений, в ряде случаев приводящих к деструкции бетона.

Существуют противоречивые мнения о роли гипса в процессах гидратации цементных систем. Ускорение ранней гидратации C_3S в присутствии добавок сульфата кальция отмечается в работах [1; 2]. Авторами [3] установлено, что повышение дозировки гипса приводит к некоторому замедлению схватывания цемента с одновременным увеличением скорости нарастания прочности в ранние сроки твердения.

В исследованиях [4; 5] показано увеличение степени гидратации C_2S в цементе в присутствии гипса. Авторы [5] утверждают, что от добавки гипса в цемент удельная поверхность новообразований не претерпевает изменений в сравнении с безгипсовым цементом. Присутствие сульфата кальция заметно уменьшает количество волокнистых гидратов с одновременным увеличением количества слоистых гидратов.

При гидратации в нормальных условиях трехкальциевого алюмината в присутствии гипса легко образуется эттрингит независимо от наличия или отсутствия в системе CaO или $Ca(OH)_2$ [6]. Эттрингит предотвращает быструю гидратацию трехкальциевого алюмината путем образования защитного слоя. В этом случае происходит замедленная гидратация, продолжительность которой возрастает при увеличении добавки гипса.

Результаты исследований цементных суспензий показали, что в процессе гидратации четырехкальциевого алюмоферрита C_4AF в присутствии гипса или одновременно гипса и гидроксида кальция состав кристаллизующихся новообразований зависит от молярного отношения введенного гипса и четырехкальциевого алюмоферрита n. При $n \geq 4$ основным продуктом реакции является трехсульфатная форма гидросульфоалюмоферрита кальция

$$3CaO \cdot xAl_2O_3 \cdot 4Fe_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$$

($x + y = 1$; y в растворе гипса равен 0,35, в растворе гипса и гидроксида кальция – 0,5). При $n \geq 1{,}3$ на первых этапах гидратации образуется трехсульфатная форма гидросульфоалюмоферрита кальция. В процессе дальнейшей гидратации C_4AF после полного химического связывания гипса трехсульфатная форма переходит в моносульфатную форму гидросульфоалюмоферрита кальция, а затем кристаллизуется четырехкальциевый гидроалюмоферрит и твердый раствор этих соединений. Гидроксид кальция замедляет кинетику взаимодействия C_4AF с гипсом и соответственно фазовые переходы, связанные с разложением трехсульфатной формы гидросульфоалюмоферрита кальция. При гидратации цемента в нормальных условиях с добавкой ангидрита образование трехсульфатной формы гидросульфоалюмината кальция наблюдается в течение первого часа, а спустя 6 ч наблюдается заметное образование моносульфата алюмината кальция [7].

На развитие прочности цементного камня в условиях продолжающейся гидратации и особенно в более поздние сроки твердения существенно влияют превращения, протекающие в сульфатсодержащих фазах цементного камня.

В начальный период гидратации цементных систем всегда образуется трехсульфатная форма гидросульфоалюмината кальция, способствуя раннему возникновению каркаса пространственной кристаллизационной структуры, что в свою очередь обеспечивает повышение прочности цементного камня в ранние сроки твердения.

В этом отношении сведения о влиянии гипса на прочностные характеристики цементной системы весьма противоречивы. Так, в работе [8] отмечена высокая механическая прочность и плотность цементного камня нормального твердения при образовании значительного количества эттрингита, однако не рассмотрено влияние на свойства цементного камня перекристаллизации трехсульфатной формы гидросульфоалюмината кальция в моносульфатную. Также установлено, что карбонизация богатого эттрингитом цементного камня приводит к значительной потере прочности, поскольку остаточный объем карбонизированного эттрингита по сравнению с первоначальным объемом эттрингита составляет 56 %, а объем возникших пор достигает 44 %.

Исследованиями [9] установлен эффект перекристаллизация первичного эттрингита в моногидросульфоалюминат кальция после связывания всего гипса. При этом на рентгенограммах цементного камня отмечается появление дифракционных пиков моногидросульфоалюмината кальция (линии $d = 8{,}9$ и $4{,}45 \cdot 10^{-10}$ м) с одновременным понижением интенсивности линий эттрингита ($d = 9{,}73$ и $5{,}61 \cdot 10^{-10}$ м). Скорость превращения первичного эттрингита в моносульфатную форму в условиях продолжающейся гидратации при прочих равных условиях определяется минералогическим составом цемента, в частности, содержанием в клинкере C_3A.

С целью исследования влияния минералогического состава клинкера и содержания гипса на процессы гидратообразования в различных условиях исследованы портландцементные клинкеры различного минералогического состава (табл. 1).

Таблица 1

Минералогический состав портландцементных клинкеров

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	C_3S/C_3A
49	29	14	8	3,5
53	26	10	11	5,3
57	22	8	13	7,1
59	19	11	11	5,4
61	21	5	13	12,2

По результатам исследований установлено, что в процессе физико-химической активации создаются условия для образования моносульфатной формы гидросульфоалюмината кальция, способствуя возникновению пространственной структуры, не вызывающей в более поздние сроки деструктивных изменений вследствие перекристаллизации тригидросульфоалюмината кальция.

Относительно гидратации четырехкальциевого алюмоферрита в присутствии гипса следует отметить, что увеличение количества $CaSO_4$, сопровождающееся уменьшением

удельной поверхности новообразований, вызывает прогрессирующее замедление вторичной экзотермической реакции.

Кристаллы эттрингита характеризуются игольчатой формой. Согласно данным [10] на морфологию эттрингита влияет содержание кальция и сульфата в растворе. В растворах с пересыщением гидроксидом кальция и высокой концентрацией сульфата эттрингит образуется в виде коротких призматических кристаллов; напротив, в ненасыщенных растворах образуются удлиненные игольчатые кристаллы эттрингита. Очевидно, что первые кристаллы эттрингита, сформировавшиеся в пересыщенной относительно гидроксида кальция жидкой фазе цементного теста, имеют форму коротких призм и только на более поздних стадиях гидратации развиваются удлиненные игольчатые кристаллы. Отсюда можно заключить, что такой порядок кристаллизации трехсульфатной формы гидросульфоалюмината кальция приводит к деструктивным процессам в объеме цементного камня.

Увеличение прочности цементного камня в присутствии гипса в раннем возрасте объясняется образованием совмещенного $C-S-H$ изоморфного типа, где ион SO_4^{2-} гипса замещает ион SiO_4^{4-} гидросиликата с выходом некоторого количества ионов SiO_4^{4-} в жидкую фазу. Справедливость этого положения с теоретических позиций обосновывается не только одинаковым ионным радиусом Si^{4+} ($1{,}10\cdot10^{-10}$ м) и S^{6+} ($1{,}0\cdot10^{-10}$ м), но также аналогичным тетраэдрическим расположением атомов кислорода в анионах SiO_4^{4-} и SO_4^{2-}, которое было экспериментально подтверждено избирательной экстракцией растворителя и термоаналитическими измерениями [11]. Эти данные согласуются с предположением о существовании включений сульфатного аниона в виде твердого раствора внедрения или замещения в гель гидросиликата кальция. Поскольку в нормальных условиях твердения реакция между гелем $C-S-H$ и сульфатом проходит с незначительным выделением кремнезема, то внедрение ионов SO_4^{2-} в решетку практически приводит к увеличению объема основной структуры, в результате чего образуется большое количество геля. Отсутствие при этом избытка ионов Ca^{2+} в жидкой фазе по сравнению с составом жидкой фазы безгипсового цемента объясняется адсорбцией избыточного количества ионов Ca^{2+} для компенсации электростатического заряда, возникающего при внедрении в кристаллическую решетку силикатов ионов SO_4^{2-}. Очевидно, что возрастание прочности цементного камня в присутствии гипса в ранние сроки нормального твердения обусловлено только количественным, а не качественным влиянием геля $C-S-H$ [12].

Результаты исследований изменения прочности бетона на клинкерах различного минералогического состава с введением гипса в количестве 4…10 % в процессе физико-химической активации приведены на рис. 1. Для исследования влияния количества гипса использованы клинкеры активностью 40…60 МПа.

Анализ графиков изменения прочности бетона в зависимости от значений отношения C_3S/C_3A показывает, что повышенное содержание трехкальциевого алюмината благоприятно влияет на прочность бетона сразу после тепловой обработки. Однако для образцов, твердевших после тепловой обработки в нормальных условиях в течение 27 сут. и не подвергнутых тепловой обработке, наблюдается обратная зависимость прочности от содержания C_3A. При значении отношения $C_3S/C_3A = 5{,}4$ на кривых наблюдается отчетливая точка перегиба.

Для активированной цементной системы значительные колебания прочности при изменении отношения C_3S/C_3A не наблюдаются. Это объясняется отсутствием отрицательного влияния предельного содержания алюминатов кальция на прочность активированных цементных систем, которое устраняется варьированием количественного содержания химически активных компонентов цементной системы. В результате проведенных исследований установлена возможность управления морфологией сульфогидратов в процессе физико-химической активации цементных систем, что предопределяет получение высокопрочных бетонов специального назначения, не подвергаемых деструкции.

В процессе тепловлажностной обработки происходит ускоренное образование эттрингита в форме длинных кристаллов, которые с течением времени перекристаллизовываются в моносульфатную форму, что приводит к микротрещинообразованию в цементной матрице бетона.

Исследованиями микроструктуры цементного камня нормального твердения и прошедшего тепловлажностную обработку установлено, что в пористых участках структуры содержатся неупорядоченные образования геля $C-S-H$, смешанные с выступающими в по-

ровое пространство призмами трехсульфатной формы гидросульфоалюмината кальция и гексагональными пластинами четырехкальциевого гидроалюмината. Длина призм эттрингита около $3{,}5 \cdot 10^{-5}$ м, ширина – до $5 \cdot 10^{-8}$ м [13].

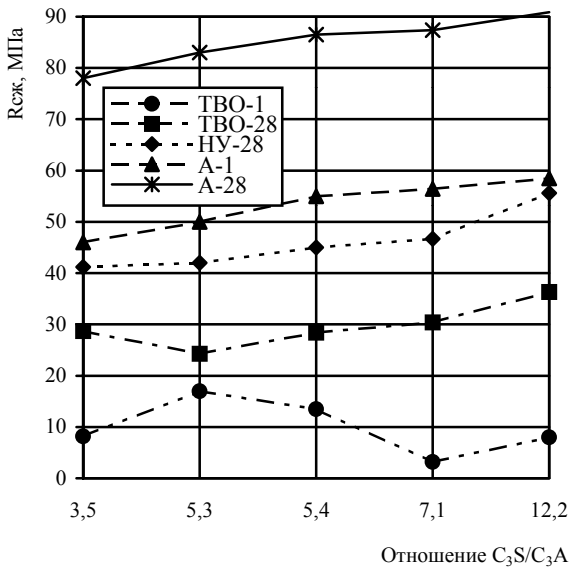


Рис. 1. Прочность бетона на различных клинкерах, твердевшего в разных условиях

Производные алюминатной и ферритной составляющих клинкера в специфических условиях физико-химической активации являются фазами, наиболее склонными к изменению химического состава и морфологии. При этом создается возможность для зародышеобразования C_4AH_{19} и C_2AH_8, минуя стадию превращения алюминатов в C_3AH_6. Такая цементная система отличается пониженной пористостью, особенно в области характерных эффективных радиусов, а также значительным ростом прочности.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о целесообразности физико-химической активации цементной системы, содержащей химически активные компоненты, с целью получения бетонов специального назначения с заданными проектными характеристиками. При этом исключается необходимость тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий и конструкций любой массивности, что позволяет существенно снизить их себестоимость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kondo R., Ueda S. Kinetics and Mechanisms of the Hydration of Cements. – Tokyo, 1968. – Vol. 2. – P. 203–248.
2. Collepardi M., Marchese B. Morphology and Surface Properties of Hydrated
3. Tricalcium Silicate Pastes // Cem.Concr. Res. – 1972. – Vol. 2. – P. 57–65.
4. Теория цемента / Под ред. А. А. Пащенко. – К.: Будівельник, 1991. – 168 с.
5. Механизм гидратации алита / Л. Г. Шпынова, Н. В. Белов, М. А. Саницкий, В. И. Чих // ДАН СССР. – 1977. – Т. 236. – № 1. – С. 168–131.
6. Механизм и долговечность действия некоторых добавок на свойства портландцемента / Л. Г Шпынова, И. И. Никонец, М. В. Мельник, С. К. Мельник // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. – 1979. – Т. 22. – Вып. 3. – С. 344–349.
7. Oberholster R. E. Pore structure, permeability and diffusivity of hardened cement paste and concrete in relation to durability // 8-th Intern. Congr. Cement. – 1986. – Vol. 1. – P. 323–335.
8. Пунагин В. Н., Пшинько А. Н., Руденко Н. Н. Бетон в условиях повышенных температур. – 2 изд., испр. и доп. – Д.: Арт-Пресс, 1999. – 292 с.
9. Uchikawa H., Tsukiyama K. The hydration of Jet Cement at 20 °C // Cem. Concr. Res. – 1973. – Vol. 3. – P. 263–277.
10. Тейлор Х. Ф. У. Гидросиликаты кальция // Труды V Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат. – 1973. – С. 156–172.
11. Mehta P. K. Morphology of calcium sulfoaluminate hydrates // Y. Amer. Ceram. Soc. – 1969. – Vol. 52. – P. 521–522.
12. Rio A., Celani A., Saini A. New investigations on the action mechanism and on the gypsum and calcium chloride influence on the structural and mechanic characteristics of the hydrosilicates get out from the C_3S hydration // II Cemento 67, N. S. – 1970. – Vol. 1. – P.17–26.
13. Пшинько А. Н., Руденко Н. Н. Проблемы ремонта инженерных транспортных сооружений // Залізничний транспорт України. – 2000. – № 3. – С. 12–14.
14. Пшинько А. Н., Пунагин В. Н., Руденко Н. Н. Особенности структурообразования алюминатов в активированных цементных системах // Будівництво: Зб. наук. пр. ДІІТу. – Д.: Арт-Пресс. – 2000. – Вып. 8. – С. 126–130.

Поступила в редколлегию 26.01.04.

УДК 624.07.531.1

К. И. СОЛДАТОВ, Г. С. ЖЕЛЕЗНЯК (ДИИТ), К. В. ГУРЖИЙ («Сервисстрой» Ростов-на-Дону)

О ЖЕСТКОСТИ ОПОР РЕАЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

У статті розглянуте питання визначення реальної жорсткості мостових опор і необхідності в деяких випадках при розрахунку власних частот мостових конструкцій замінити абсолютно жорсткі опори пружними.

В статье рассмотрен вопрос определения реальной жесткости мостовых опор и необходимости в некоторых случаях при расчете собственных частот мостовых конструкций заменить абсолютно жесткие опоры упругими.

The article considers the questions of defining the actual rigidity of bridge supports and arising in some cases necessity of replacement the absolutely rigid supports for resilient ones in calculation of the own frequencies of bridge designs.

Поскольку жесткость опор оказывает доминирующее влияние при определении собственных частот реальных мостовых конструкций, рассмотрен вопрос о их жесткости (в частности, нескольких опор мостов разного типа). При изложении данного практического материала речь будет идти об упругих опорах, поскольку понятие абсолютно жестких опор может употребляться только в теоретических исследованиях.

Анализируя влияние изменения относительной жесткости опор [1] в пределах $c'' = 0 - \infty$ на частоту свободных колебаний, необходимо знать, какова реальная жесткость опор применительно в данном случае к мостостроению.

В большинстве работ научного плана, освещающих колебательные процессы мостовых и строительных конструкций, жесткость опор для упрощения расчетных схем и, естественно, расчетов принимается равной бесконечности. Тем не менее, опору моста нельзя рассматривать как единый стержень с постоянной жесткостью, так как система опирания пролетного строения (упругая опора) состоит из нескольких, различных по жесткости, элементов, а именно в общем случае: опорной части, подферменника, ригеля, тела опоры, цокольной части, фундамента, основания фундамента. В этом случае коэффициент жесткости опоры моста в общем случае будет определяться по известной зависимости [2]

$$\frac{1}{c_0} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{c_0^i}, \qquad (1)$$

откуда жесткость равна

$$c_0 = \frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{i=n} \frac{1}{c_0^i}}. \qquad (2)$$

Коэффициент жесткости отдельно для каждого слоя (элемента) определяем по известной зависимости [3]

$$c_0^i = \frac{E_i F_i}{l_i}, \qquad (3)$$

где l_i – длина элемента; E_i, F_i – площадь сечения и модуль упругости i -го элемента.

В качестве примеров рассмотрим реальные типовые и нетиповые решения опор мостов на естественном основании и на свайном. Расчеты осадок оснований мостовых опор выполнены с использованием стандартных программ MS 101 и MS 140 Воронежским филиалом Гипродорнии. Кроме того, расчет фундамента как условного выполнен по СНиП 2-05-03-84.

Пример 1

Рассмотрим опору моста через реку Дон у г. Аксай (Ростовская область), рис. 1.

На рис. 2 приведена расчетная схема системы опирания, где: c_o^i – коэффициент жесткости, численно равный силе, вызывающей перемещение, равное единице; i – порядковый номер элементов системы опирания: *1* – опорна часть; *2* – подферменик, *3* – ригель и тело опоры, *4* – цокольная часть опоры, *5* – ростверк; *6* – фундамент, *7* – подставка фундамента.

Большинство авторов научных работ по статической и динамической работе мостов и мостовых конструкций при расчете реальных объектов полагают, что опору моста можно рассматривать как абсолютно жесткую, что, казалось бы, не должно противоречить их действительной работе. Рассмотрим возможные значения коэффициента жесткости опорных частей применительно к формуле (1). В настоящее время в мостостроении приме-

няется в основном два вида опорных частей (по роду материала): металлические и резиновые (полиуретановые). Как разновидность комбинированных опорных частей применяются резинометаллические опорные части, в которых слои металла и резины чередуются между собой. Отметим, что в случае временного строительства или в стадии монтажа может применяться опирание через деревянные брусья (шпалы), а сами опоры при этом могут быть временными из элементов МИК.

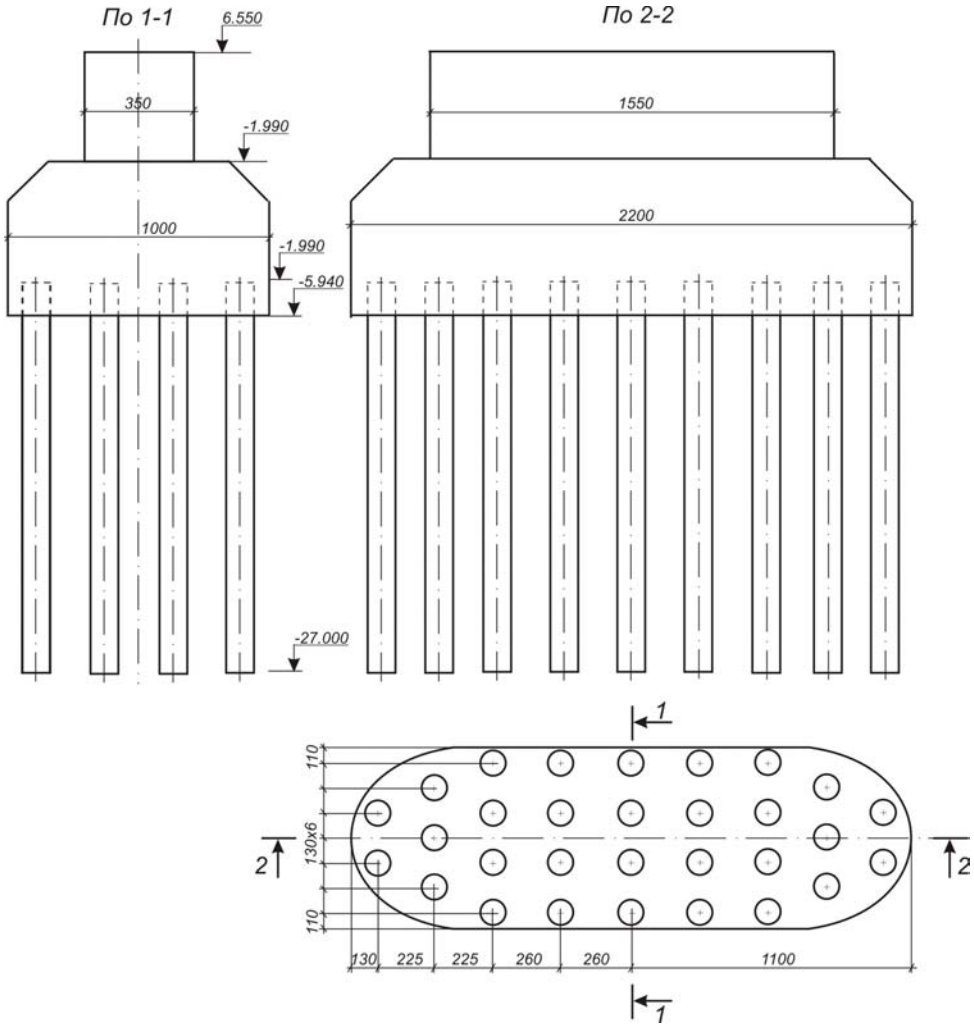


Рис. 1. Опора моста

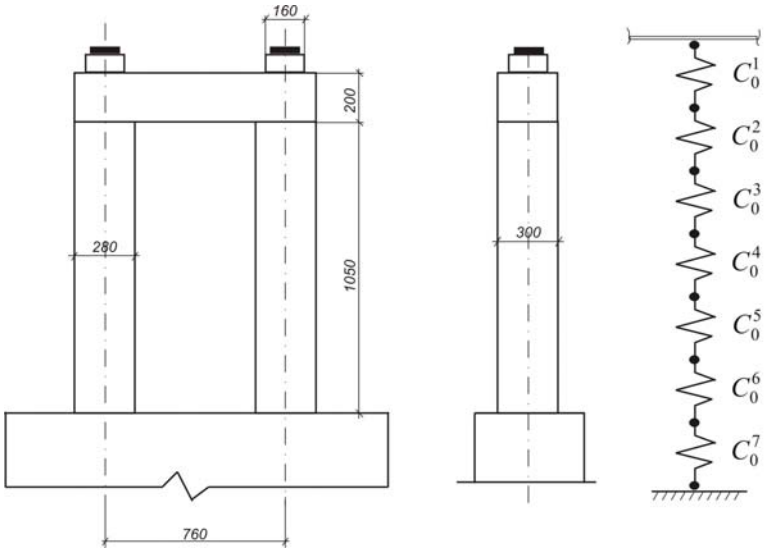


Рис. 2. Расчетная схема системы опирания

В качестве резиновых опорных частей применяются РОЧСП различных типоразмеров и армированные различным количеством стальных листов из стали Ст.73 или Ст.20. При это применяются в основном резина двух марок – Н0-68-1 и ИРП-1347-1.

В последнее время [4] широкое применение находят неармированные опорные части из полиуретана с модулем упругости $E_0 = 35$ МПа.

Для стальных опорных частей $c_0^1/2$ колеблется в пределах $(5\ldots8)\cdot10^6$ кН/м. Для комбинированных опорных частей моста через реку Дон у г. Аксай $c_0^1/2 = 0{,}288\cdot10^6$ кН/м. Для временного опирания, состоящего из двух рядов шпал, уложенных поперек оси моста, $c_0^1/2 = (0{,}006\ldots0{,}012)\cdot10^6$ кН/м. Для РОЧСП размером $30\times40\times7{,}8$ см $c_0^1/2 = 0{,}0538\cdot10^6$ кН/м.

Для опоры [5] моста через р. Дон подсчитаны с использованием данных проекта пять коэффициентов:

$$c_0^2 = \frac{2\cdot2{,}2\cdot1{,}8\cdot2{,}03\cdot10^6}{0{,}2} = 804\cdot10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^3 = \frac{2\cdot3\cdot2{,}8\cdot2{,}03\cdot10^6}{12{,}5} = 27{,}3\cdot10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^4 = \frac{3{,}5\cdot15{,}24\cdot2{,}03\cdot10^6}{7{,}55} = 143{,}4\cdot10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^5 = \frac{10\cdot22\cdot2{,}03\cdot10^6}{3{,}5} = 1276\cdot10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^6 = \frac{30\cdot3{,}14\cdot0{,}8\cdot2{,}03\cdot10^6}{22{,}5} = 54{,}4\cdot10^6 \text{ кН/м}.$$

Расчет основания опоры произведен по деформациям согласно [6]. Рассматриваемая опора имеет свайное основание. Расчет производим как для условного фундамента на естественном основании в соответствии с требованиями, изложенными в [7]. Границы условного фундамента (рис. 3) определяются: снизу плоскостью АВ, проходящей через нижние концы свай; с боков – вертикальными плоскостями АВ и БГ, отстоящими от наружных граней крайних рядов свай на расстоянии

$$\Delta = h\,\mathrm{tg}\frac{\varphi_{11,mt}}{4}, \qquad (4)$$

где $\varphi_{11,mt}$ – осредненное расчетное значение угла внутреннего трения грунта

$$\varphi_{11,mt} = \frac{\sum_0^h \varphi_{11,i} h_i}{\sum h_i}, \qquad (5)$$

где $\varphi_{11,i}$ – расчетное значение углов внутреннего трения для отдельных пройденных сваями слоев грунта толщиной h_i; h – глубина погружения свай в грунт.

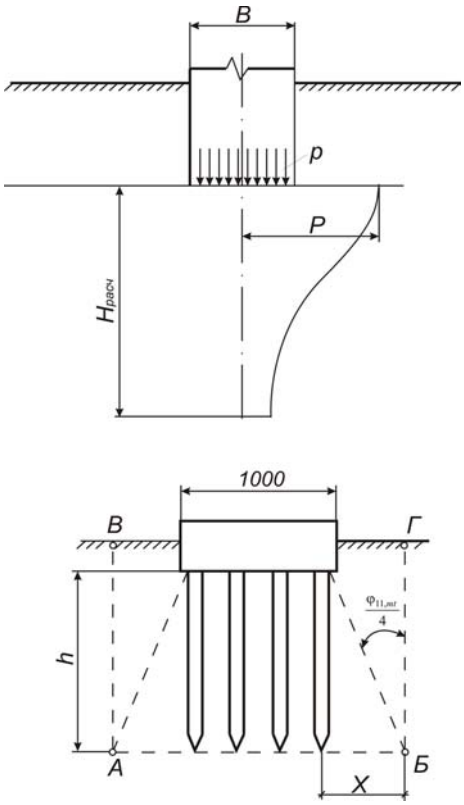


Рис. 3

Расчетную схему основания принимаем согласно [7, п. 3.49, рис. 3] в виде линейно деформируемого слоя конечной толщины. Для рассматриваемой опоры $\varphi_{11,mt} = 29°\,08'$; $X = 355{,}4$ см; ВА = ГБ = 3014 см. По оси моста $l + 2 = 2831$ см.

Расчет деформации производим по формуле [7]:

$$S \le S_{\text{пр}}; \quad S = bpM\sum_{i=1}^{n}\frac{k_i - k_{i-1}}{E_i}, \qquad (6)$$

где S – осадка фундамента, м; b – ширина фундамента, м; p – среднее давление на грунт под подошвой фундамента, МПа; M – поправочный коэффициент, определяемый в зависимости от соотношения толщины упругого слоя и полуширины фундамента; n – количество слоев в пределах упругого слоя; k_i – коэффициент, определяемый в зависимости от m' и n

(соотношения сторон фундамента); E_i – модуль деформации i-го слоя грунта, МПа;

$$m' = \frac{2H_{\text{рас}}}{b} = \frac{2 \cdot 7,631}{16,31} = 0,9357,$$

где $H_{\text{рас}} = H_0 + tb$; H_0 и t принимается для песчаных грунтов соответственно 6 м и 0,1;

$$H_{\text{рас}} = 6 + 0,1 \cdot 16,31 = 7,631 \text{ м};$$

$$M = 0,95; \quad E = 28 \text{ МПа};$$

$$n = \frac{l}{b} = \frac{28,31}{16,31} = 1,74.$$

Так как сжимаемый слой один, то $k_{i-1} = 0$;

$$k_i = f(n; m') = f(1,74; 0,94) = 0,234;$$

$$p = \frac{\sum N}{bl};$$

$$\sum N = N_1 + N_2 + N_3,$$

где N_1 – нагрузка на опору от пролетного строения, кН; N_2 – нагрузка на опору от собственного веса опоры, кН; N_3 – нагрузка на основание от грунта, входящего в расчетный фундамент, кН.

Согласно типовому проекту вес пролетного строения $l_p = 126$ м составляет $N_1 = 9321$ кН; вес опоры $N_2 = 69220$ кН; вес грунта, учитываемого в расчетах $N_3 = 187681$ кН. Суммарная нагрузка $\sum N = 266223$ кН.

Давление по подошве фундамента от указанной суммарной нагрузки составит

$$p = \frac{266223}{28,31 \cdot 16,31} = 576,6 \text{ кН/м}^2,$$

что, в свою очередь, при указанных параметрах вызовет осадку фундамента

$$S = \frac{16,31 \cdot 576,6 \cdot 0,95 \cdot 0,234}{280} = 0,07466 \text{ м}.$$

Коэффициент жесткости основания опоры

$$c_0^7 = \frac{\sum N}{S} = \frac{266223}{0,07466} = 3,56 \cdot 10^6 \text{ кН/м}.$$

Предварительно анализируя значения всех коэффициентов жесткости и согласно (2), видим, что решающую роль в определении приведенной жесткости играет именно жесткость опорной части. Подставляя в (2) значения найденных жесткостей отдельных составляющих, получим значение коэффициента жесткости системы опирания $c_0 = 0,481 \cdot 10^6$ кН/м, соизмеримое со значением жесткости опорной части.

Таким образом, указанный пример показывает, что коэффициент жесткости опоры в целом можно определять, учитывая лишь жесткость самой опорной части и в некоторых случаях – жесткость основания опоры. В этом случае получаем некоторое уточнение жесткости опирания $c_0 = 0,497 \cdot 10^6$ кН/м. Остальные пять параметров жесткости опирания дают в совокупности уточнение всего на 3,1 %.

Относительная жесткость упругой опоры моста в данном случае (при $A = 6410,46$ см^2; $S = 199860$ см^3; $I_x = 1797,23 \cdot 10^4$ см^4; $E = 2,1 \cdot 10^6$ кг/см^2; $l = 126,0$ м) для стали 10ХСНД и 15ХСНД согласно формуле составит

$$c' = \frac{c_0 l_i^3}{E_i I_i} = 2552,$$

где c_0 – жесткость упругой опоры, имеющая размерность кН/м; l_1 – длина первого пролета; E_1, I_1 – жесткость первого пролета балки; c' – относительная жесткость упругой опоры.

Принимая неразрезную схему пролетного строения $L = 2 \cdot 126$ м по формуле $c'' = \frac{c'}{\overline{l_1}^3} = \frac{c_0 L^3}{E_1 I_1}$, ($L$ – полная длина неразрезной балки), получаем значение приведенной относительной жесткости опоры, равное $c'' = 20416$. Оба указанные значения согласно выполненным исследованиям с очень небольшой погрешностью можно принимать равными бесконечности, что значительно упрощает динамические расчеты за счет упрощения расчетных моделей.

Следующий пример показывает, что для опор стоечного типа указанными рекомендациями можно пользоваться с большой осторожностью.

Пример 2

Рассмотрим жесткость опоры стоечного типа на естественном основании. Схема опоры и основные размеры приведены на рис. 4.

На опору опираются типовые пролетные строения $l_1^n = 12,7$ м; $l_2^n = 15,83$ м; $l_1^p = 12,0$ м; $l_2^p = 15,0$ м. Модуль упругости тела опоры

$E_б = 31,5$ МПа. Постоянная нагрузка на один фундамент (суммарная) $\sum N = 50,3$ тс.

Геологический разрез по оси опоры (по слоям сверху-вниз) следующий:

- песок средней крупности ($h_1 = 4,4$ м);
- песок мелкий ($h_2 = 2,3$ м);
- суглинок ($h_3 = 1,4$ м);
- песок средней крупности ($h_4 = 6,3$ м).

На рис. 4 приведена также расчетная схема составляющих жесткости упругой опоры по схеме, аналогичной рассмотренной выше.

Осадка основания от указанных нагрузок, вычисленная по тем же программам MS 101 и MS 140 Воронежским филиалом Гипродорнии, составляет $S = 2,1$ мм. Жесткость всех слоев, учитываемых в расчете (см. рис. 4), определена по фактическим размерам по формулам (2) и (3) и поэлементно приведена ниже:

$$c_0^1 = \frac{0,3 \cdot 0,4 \cdot 350 \cdot 7}{0,078} = 0,377 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^3 = \frac{1,2 \cdot 11,8 \cdot 3,15 \cdot 10^6}{0,5} = 892 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^4 = \frac{0,4 \cdot 0,5 \cdot 3,15 \cdot 10^6 \cdot 5}{8,20} = 3,84 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^5 = \frac{1,2 \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 5}{1} = 378 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^6 = \frac{2,5 \cdot 2,8 \cdot 3,15 \cdot 10^6 \cdot 5}{0,3} = 3675 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^7 = \frac{503}{0,0021} = 239524 \text{ кН/м}.$$

По формуле (2) $c_0 = 0,144 \cdot 10^6$ кН/м.

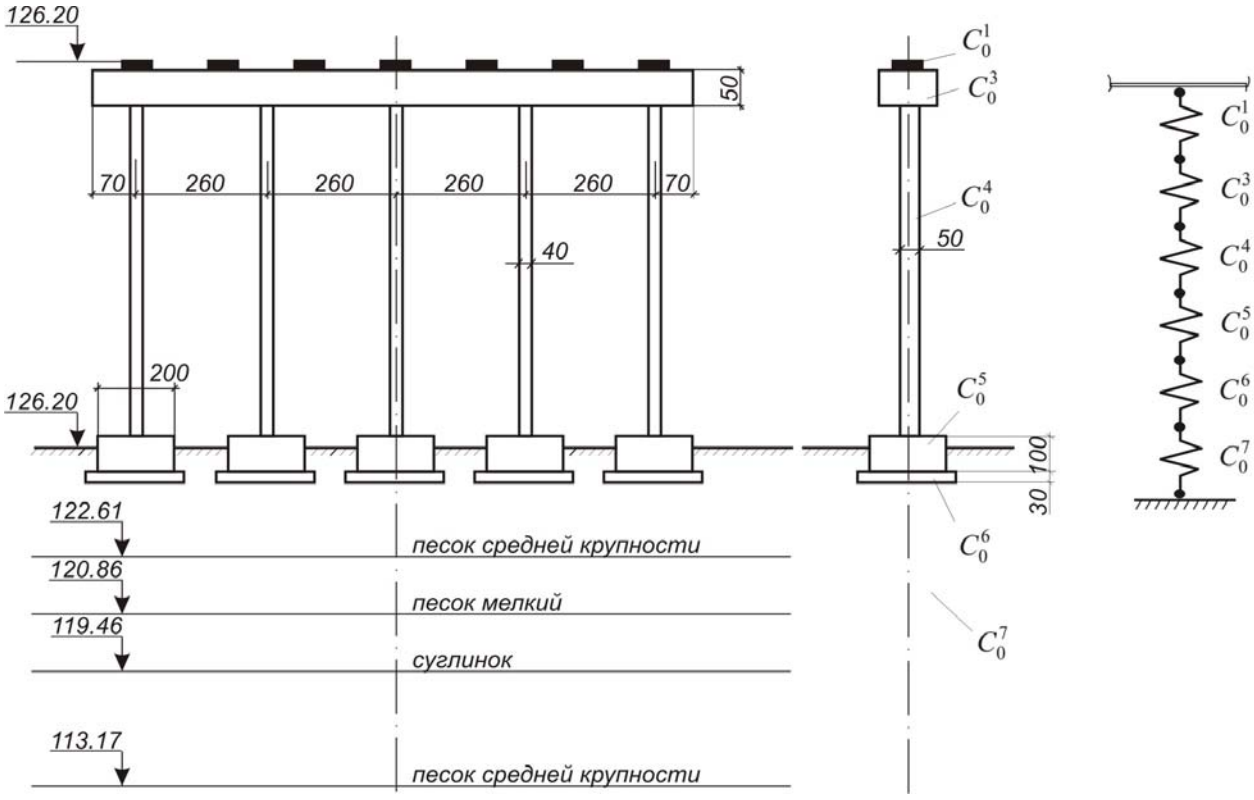


Рис. 4

Уже для данного типа опор при расчете жесткости необходимо, кроме жесткости опорной части, учитывать жесткость фундамента. В процентном соотношении жесткость опорной части составляет 37 %, а основания – 59 %.

Пример 3

Рассмотрим опору стоечного типа из столбов диаметром 1,0; 1,2; 1,6 м. Фундаменты опоры на естественном основании. Схема опоры и расчетная схема для определения приведенной жесткости приведена на рис. 5. Осадка фундамента согласно расчетам по тем же программам составляет $S = 0,313$ см.

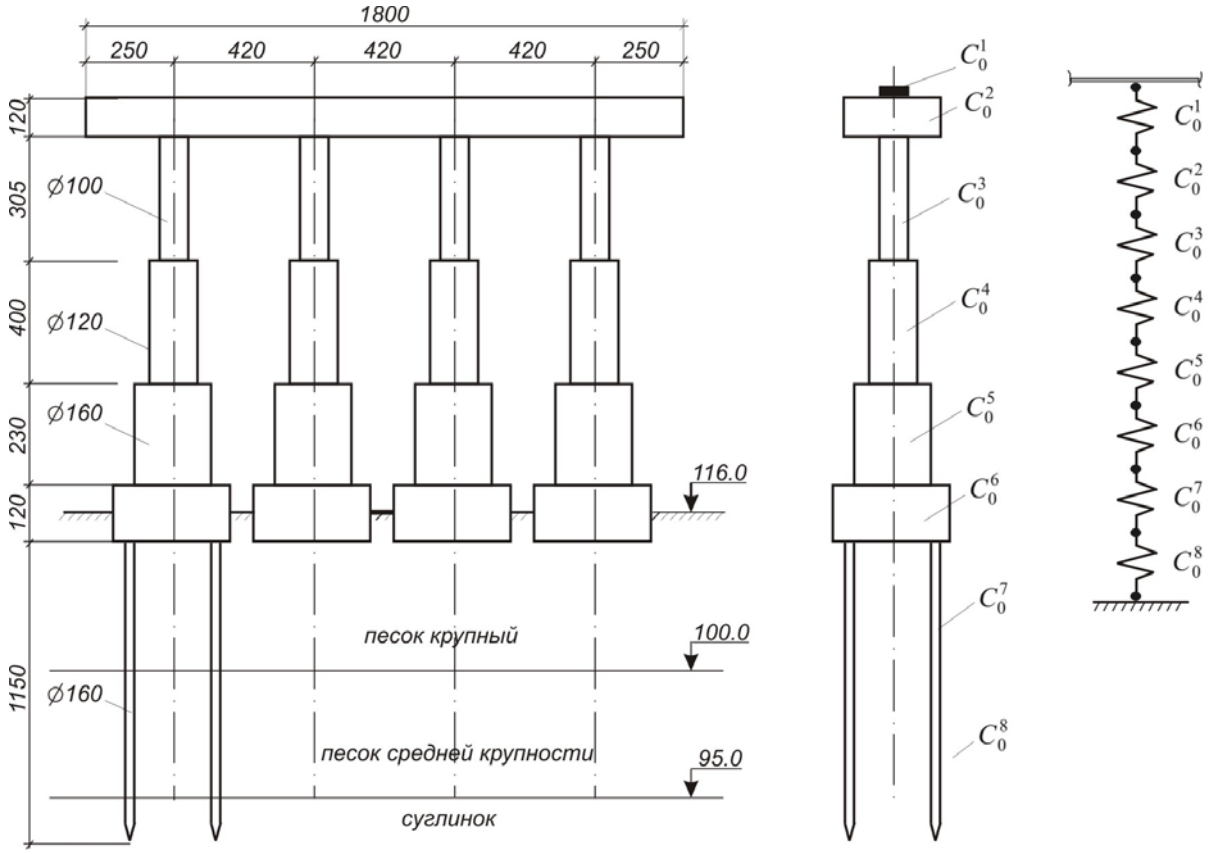


Рис. 5

Модуль упругости тела опоры, ригеля и свай принят $E_1 = 35$ МПа, ростверка $E_2 = 31{,}5$ МПа. Геологический разрез по оси опоры в пределах расчетной глубины представляет собой следующее:

- песок крупный ($h_1 = 16{,}0$ м);
- песок средней крупности ($h_2 = 5{,}0$ м);
- суглинок.

На данную опору опираются те же пролетные строения, что и примере 2. Постоянная нагрузка на куст с учетом расчета свайного фундамента как массивного составляет $\sum N = 9735$ кН, где нагрузка от грунта составляет $N_3 = 8530$ кН. Осадка фундамента, рассчитанная по приведенным выше программам, составляет 43,6 мм. Коэффициенты жесткости, просчитанные по формулам (2) и (3), составляют соответственно:

$$c_0^1 = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}4 \cdot 350 \cdot 12}{0{,}078} = 0{,}646 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^2 = \frac{2{,}2 \cdot 18 \cdot 3{,}5 \cdot 10^6}{1{,}2} = 115{,}5 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^3 = 0{,}5 \cdot 3{,}14 \cdot 3{,}5 \cdot 10^6 \cdot 4 = 36{,}05 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^4 = 0{,}6 \cdot 3{,}14 \cdot 3{,}5 \cdot 10^6 \cdot 4 = 39{,}6 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^5 = 0{,}8 \cdot 3{,}14 \cdot 3{,}5 \cdot 10^6 \cdot 4 = 122{,}4 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^6 = 2{,}5 \cdot 2{,}5 \cdot 3{,}15 \cdot 10^6 \cdot 4 = 729{,}2 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^7 = 0{,}3 \cdot 3{,}14 \cdot 3{,}5 \cdot 10^6 \cdot 4 = 13{,}77 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^8 = 97349 / 0{,}0436 = 2{,}23 \cdot 10^6 \text{ кН/м}.$$

Приведенная величина жесткости в данном случае составляет $c_0 = 0{,}162 \cdot 10^6$ кН/м, а в процентном отношении жесткость опорной части составляет 25 % и жесткость основания 72 %.

Пример 4

Рассматриваемая опора стоечного типа на естественном полускальном основании приведена на рис. 6, там же дана и расчетная схема для определения приведенной жесткости. В данном случае модуль упругости бетона и ригеля, стоек и фундамента принят согласно типовому проекту $E_б = 30{,}6$ МПа.

На опору опирается пролетное строение $l'' = 15{,}83$ м. Грунт полускальный $R_c = 40$ МПа, плотность грунта $\gamma = 2{,}0$ кН/м^3. Суммарная нагрузка на основание от постоянной нагрузки составляет $\sum N = 4972$ кН.

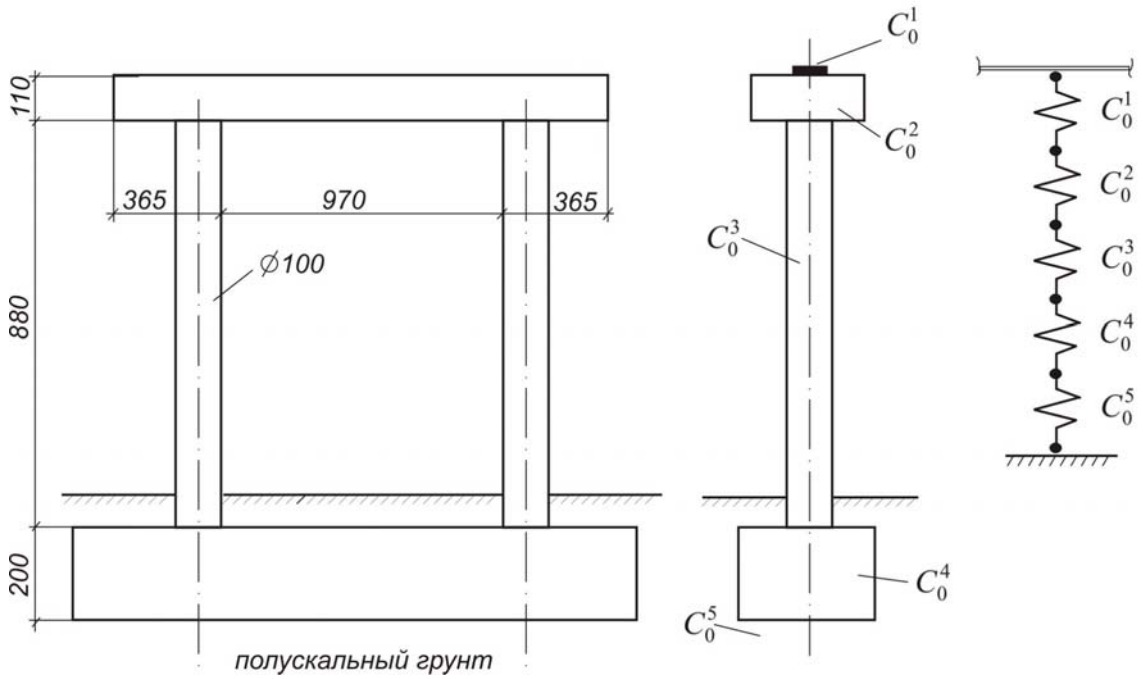


Рис. 6

Подсчет жесткостей отдельных компонентов согласно расчетной схеме рис. 6 дает следующие величины:

$$c_0^1 = \frac{0,3 \cdot 0,4 \cdot 350 \cdot 12}{0,078} = 0,646 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^2 = \frac{1,65 \cdot 17,0 \cdot 3,06 \cdot 10^6}{1,1} = 780,3 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^3 = \frac{0,5 \cdot 3,14 \cdot 3,06 \cdot 10^6}{8,8} = 5,46 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^4 = \frac{12,5 \cdot 3,0 \cdot 3,06 \cdot 10^6}{2,0} = 573,8 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^5 = \frac{4972}{0,00313} = 1,588 \cdot 10^6 \text{ кН/м}.$$

Откуда суммарная жесткость опоры $C_0 = 423150,6$ кг/см. Как и в предыдущих примерах, две величины – жесткость опорной части и основания – составляют 90 % приведенной жесткости.

Подводя итог, можно констатировать, что в реальных расчетах для определения жесткости опор можно вводить в расчет лишь две составляющие: жесткость опорной части и фундамента. Остальные параметры в сумме оказывают влияние на конечный результат не более 10 %.

Однако более важным выводом в данном случае следует считать другой:

- при динамических расчетах вертикальных колебаний мостов нельзя принимать жесткость промежуточной опоры равной бесконечности;
- при определении жесткости опоры жесткости фундаментов и опорных частей соизмеримы друг с другом.

В целом все это подтверждает необходимость применения расчетных схем, в которых промежуточные опоры принимаются не жесткими, а упругими.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ананьев С. А., Чудинов В. В. Синтез уравнений колебаний неоднородной струны // Дифференциальные уравнения с частными производными: Сб. тр. ЛГПУ. – Л., 1990. – С. 23–30.
2. Корнеев Б. Г., Рабинович И. Н. Динамический расчет зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1984. – 106 с.
3. Указания по конструированию, расчету и применению полиуретановых опорных частей мостов (ВСН 38-86, Миндорстрой БССР), 1986.
4. Проект мостового перехода через реку Дон у г. Аксай на обходе г. Ростова-на-Дону. – Тбилгипроавтодортранс, 1985.
5. Основания зданий и сооружений, СНиП 11-15-74, Государственный комитет по делам строительства. – М., 1975.

Поступила в редколлегию 26.11.03.

УДК 624.07.531.1

К. І. СОЛДАТОВ, А. Г. КРЮК (ДІІТ)

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ РОБОТИ МЕТАЛЕВОГО АРОЧНОГО МОСТА ЧЕРЕЗ Р. СТАРИЙ ДНІПРО У МІСТІ ЗАПОРІЖЖЯ

У статті на прикладі існуючого металевого арочного моста у м. Запоріжжя розглянуто застосування методики «пружних моделей» при розрахунках на коливання та стійкість подібних конструкцій. Власні вертикальні коливання арочної прогонової будови знаходяться у не рекомендованому нормами діапазоні періоду коливань (0,45…0,60 с.). На підставі розрахунків по наведеній методиці та аналізу результатів зроблено висновок щодо можливості стабілізації арочної прогонової будови.

В статье на примере существующего металлического арочного моста в г. Запорожье рассмотрено использование методики «упругих моделей» при расчетах на колебания и устойчивость подобных конструкций. Собственные вертикальные колебания арочного пролетного строения находятся в не рекомендованном нормами диапазоне периода колебаний (0,45…0,60 с.). На основании расчетов по приведенной методике и анализа результатов сделан вывод о возможности стабилизации арочного пролетного строения.

The article, based on the example of an existing metal arch bridge in Zaporozhye, considers application of the «resilient models» technique in calculations of oscillations and stability of such structures. The own free vertical oscillations of the arch span of the bridge were found to be in a forbidden range (0.45 to 0.60 sec). Based on the presented technique, recommendations The article, based on the example of an existing have been developed on reconstruction and dynamic stabilization of the arch span structure.

У роботах [1; 11] наведена загальна методика застосування «пружних моделей» при розрахунках складних мостових споруд на коливання та стійкість. Ця методика опрацьована при розрахунках вільних коливань висячих і вантових мостів [2; 3; 12], арочних віадуків [9], системи «гнучка арка» з балкою жорсткості [12], ферм [7; 8], балок проїжджої частини залізничних мостів [13] та ін.

Всі приклади застосування методики перевірені численними розрахунками (в тому числі і іншими методами) та підкріплені натурними експериментами.

У роботі [4] автор доводить перевагу таких моделей особливо при проектуванні, зв'язуючи безпосередньо проектування таких складних споруд з обмеженим нормами [14] періодом їх вільних коливань. Взагалі ж пропонується проектування складних мостових споруд починати не з вибору жорсткістних параметрів споруди, а з періоду вільних коливань і далі, ув'язуючи жорсткістні та вагові характеристики споруди з періодом вільних коливань таким чином, щоб автоматично виконувалась вимога норм [14, п. 1.48].

Металевий міст, що розглядається у даній роботі, має загальну довжину 320 м і арку з їздою верхом довжиною 195,6 м побудовано у 1975 р. При випробуваннях після закінчення будівництва виявилось, що період вільних коливань трьох перших форм співпав, або був близький до періоду, що не рекомендується нормами [14] ($T = 0,45…0,60$ с у вертикальній площині та $T = 0,9…1,2$ с – у горизонтальній). Ця обставина була відмічена у звіті [15], оскільки під час руху колони випробувальних машин спостерігались значні коливання прогонової будови, і було рекомендовано конструкцію якимось чином підсилити, щоб змінити період вільних коливань і вивести з нерекомендованого діапазону.

На момент написання цієї статті рух транспортних засобів по мосту закрито з приводу неможливості його експлуатації саме з причини значних коливань. Для розробки пропозицій та можливих заходів щодо зміни періоду вільних коливань використана вже опрацьована методика [4]. Однак, маючи додатково експериментальні дані по частотах вільних коливань для перших трьох форм ($\nu_1 = 1,47$ Гц, $\nu_2 = 1,80$ Гц та $\nu_3 = 2,70$ Гц), беремо їх за основу і далі ведемо розрахунки від цих величин як вихідних даних для цієї конструкції.

На підставі раніше виконаних досліджень арочних систем [1; 9; 11] приймаємо розрахункову схему для обчислення частот у вигляді нерозрізної балки на пружних опорах. Пружними опорами для балки жорсткості у даній схемі є стояки разом з аркою. Кількість прого-

нів нерозрізної балки $n=16$ приймаємо по кількості панелей арки (рис. 1).

Запишемо далі загальновідому формулу для обчислення частот вільних коливань будь-якої конструкції:

$$\nu_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi\ell^2}\sqrt{\frac{EI}{\mu}}, \qquad (1)$$

де E – модуль пружності металу, кПа; μ – погонна маса споруди; I – момент інерції нерозрізної балки, м^4; ν_i – частота вільних коливань по i-й формі, Гц; ℓ – відстань між стояками арки (панель),м; λ_i – частотний параметр, який, в свою чергу, обчислюється з рівняння частот для системи регулярна балка на пружних опорах [1].

$$\frac{sh\lambda_i}{ch\lambda_i - \cos\frac{\pi}{n}\cdot i} - \frac{\sin\lambda_i}{\cos\lambda_i - \cos\frac{\pi}{n}i} = \frac{2\lambda_i^3}{c'}, \qquad (2)$$

де n – кількість прогонів нерозрізної балки ($n=16$); i –номер форми коливань ($i=1,2,3\ldots n$); c' – відносна пружність опори

$$c' = \frac{c_o\ell^3}{2EI}, \qquad (3)$$

де c_0 – пружність проміжної опори, кН/м;

Далі маємо таку систему рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} \lambda_i^4 &= \frac{\mu\,\omega_i^2\,\ell^4}{E\,I} \\ c' &= \frac{c_0\,\ell^3}{2\,E\,I} \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

з якої найдемо залежність відносної пружності опори c' від частотного параметра λ_i, враховуючи, що всі інші параметри відомі:

$$c' = \left(\frac{\lambda_i^2}{2\pi}\right)\cdot\frac{c_0 g}{2l\nu_i^2 q}. \qquad (5)$$

Скористаємось результатами статичних випробувань даної конструкції [15] і знайдемо пружність опор розрахункової схеми:

$$c_0 = \frac{q_в L}{f_в}$$

та параметр

$$A_i = \frac{c_0 g}{2\ell\nu_i^2 q},$$

де $q_в$ – інтенсивність випробувального навантаження, що дорівнює 4,07 кН/м; $f_в$ – прогин від випробувального навантаження ($f_в = 0{,}142$ м); L – довжина розподілу випробувального навантаження ($L = 51{,}2$ м).

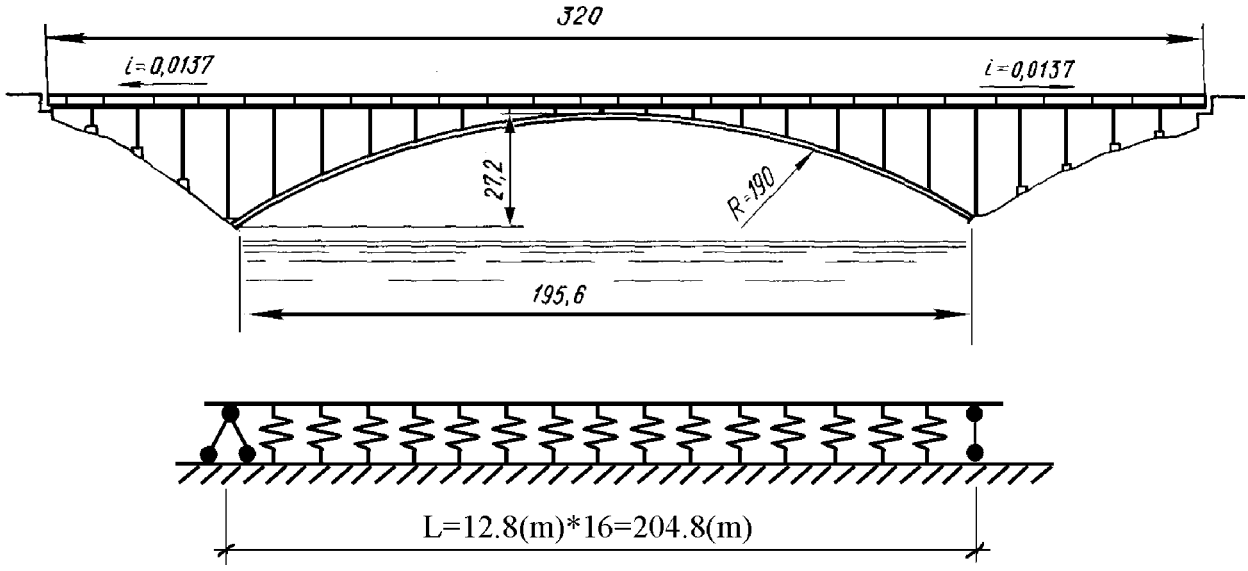


Рис. 1. Розрахункова схема

Слід відзначити, що величина c_0 є завищеною, бо при випробуваннях крім арки якусь частку навантаження сприймала балка жорсткості, і ця частка в подальших розрахунках повинна бути виключена.

За цих даних маємо $c_0 = 1467,5$ кН/м та три значення (по кількості частот) параметру A_i:

$$A_1 = 22,58; \quad A_2 = 15,265; \quad A_3 = 6,78.$$

Таким чином, маємо три значення залежностей:

$$\lambda_1^4 = 1,717 \cdot c';$$

$$\lambda_2^4 = 2,584 \cdot c'; \quad \lambda_3^4 = 5,813 \cdot c'. \qquad (6)$$

Далі скористаємось рівнянням (2) і перепишемо його у вигляді залежності c' від λ_i:

$$c' \cdot \lambda_i = \frac{2\lambda_i^4}{\dfrac{sh\lambda_i}{ch\lambda_i - \cos\dfrac{\pi}{16}\cdot i} - \dfrac{\sin\lambda_i}{\cos\lambda_i - \cos\dfrac{\pi}{16}\cdot i}}. \qquad (7)$$

З урахуванням залежностей (6) знаходимо для трьох форм коливань частотний параметр λ_i:

$$\lambda_1 = 0,470; \quad \lambda_2 = 0,570; \quad \lambda_3 = 0,654.$$

На підставі вже виконаних досліджень була перевірена можливість використання більш простої розрахункової схеми – балки на пружній основі, рівняння коливань якої має дуже простий і зручний для аналізу вигляд:

$$\lambda_i^4 - \frac{\pi^4}{n^4}\cdot i^4 = 2c'. \qquad (8)$$

Знову скориставшись залежністю (6) знаходимо частотні параметри λ_i:

$$\lambda_1 = 0,466; \quad \lambda_2 = 0,569; \quad \lambda_3 = 0,654.$$

Практично абсолютне співпадіння параметрів по двох розрахункових схемах дає нам підставу використати для подальших розрахунків та аналізу більш просту залежність (8).

Запишемо вираз (8) у розгорнутому вигляді з урахуванням загальновідомих залежностей :

$$c' = \frac{c_0\ell^3}{2EI}; \quad \lambda_i^4 = \frac{\nu_i^2(2\pi)^2\ell^4 q}{EIg}; \quad \nu_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi\ell^2}\cdot\sqrt{\frac{EIg}{q}}.$$

Після спрощення маємо таке рівняння:

$$\frac{\nu_i^2(2\pi)^2\ell q}{g} = c_0 + \frac{\pi^4 i^4}{n^4}\cdot\frac{EI}{\ell^3}. \qquad (9)$$

Підставивши у рівняння (9) відомі параметри для трьох форм коливань, маємо систему трьох рівнянь з двома невідомими c_0 та I

$$\begin{cases} 1281,6 = c_0 + 14,85\cdot I; \\ 1395,7 = c_0 + 237,6\cdot I; \\ 4265,3 = c_0 + 1203,1\cdot I. \end{cases} \qquad (10)$$

Розв'язавши систему рівнянь, знаходимо значення c_0 та I. Результати розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри	Значення параметрів c_0 та I при формах коливань			
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	Середня величина
Пружність проміжної опори $c_0^{(i)}$, т/м	1241,7	1312,4	1240,6	1264,9
Момент інерції балки жорсткості I_i, м^4	2,5152	2,4543	2,7563	2,5753

Перевірка значень частот по знайдених середніх величинах c_0 та I підтверджує правильність розрахункової схеми і можливість її використання для подальшого аналізу.

Порівняння експериментальних та розрахункових частот виконано в табличній формі і наведено в табл. 2.

Таблиця 2

i	λ_i	ν_i, Гц		Розходження
		Експеримент	Розрахунок	
1	0,4742	1,48	1,49	0,67
2	0,5192	1,80	1,79	0,56
3	0,6412	2,70	2,73	1,10

Таким чином, для зміни частот (періодів) вільних коливань з метою стабілізації динамічної стійкості конструкції, скориставшись методикою даної роботи, можна констатувати і одноразово рекомендувати.

1. Оскільки найбільший вплив на частоту коливань має жорсткість пружних опор (пружної основи) тобто арки, то її підсилення призведе до зміни частоти у бік збільшення (тобто зменшення періодів), що небажано, бо у такому випадку вони ще ближче будуть до не рекомендованого нормами діапазону .

2. Дещо ефективнішим буде підсилення самої балки, оскільки це приведе до збільшення

виразу під коренем у формулі для частоти, але в той же час – до зменшення λ_i. Ефект від такого заходу буде значно менший, ніж бажано.

3. Однозначно можна рекомендувати при проектуванні металевих арок з їздою верхом ретельно підбирати співвідношення арки (повинна бути більш гнучка) та балки жорсткості , яка повинна бути більш жорстка.

З подальшим використанням методики обчислення форм коливань при відомих значеннях (n, i, λ_i, ℓ), побудовані три перші форми коливань, які співпадають з експериментальними по основних ординатах.

Ордината форми коливань у k-му вузлі y_k та кут нахилу у тому ж вузлі φ_k обчислюються за формулами:

$$\varphi_k = \frac{m_i}{l} \cdot \cos\frac{k\pi}{n}; \quad y_k = \sin\frac{k\pi}{n}, \qquad (11)$$

де k – номер вузла; m_i – параметр форми коливань, який має для перших трьох форм такі значення:

$$m_1 = 0{,}1966; \quad m_2 = 0{,}3922; \quad m_3 = 0{,}5891$$

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Солдатов К. И. Свободные колебания регулярных балок и некоторых мостовых конструкций на упругих опорах. Дис. … канд. техн. наук. – Д., 1971. – 220 с.
2. Солдатов К. И., Казакевич М. И. Определение собственных частот колебаний однопролётных внешне распорных радиально-вантовых систем // Межотраслевые вопросы строительства: Реф. сб., – М., 1970. № 8. – С. 190–193.
3. Солдатов К. И. Приближённый метод определения собственных частот колебаний висячих мостов: Тезисы доклада на Всесоюзной конференции. МИСИ, – М., 1974. – 4 с.
4. Солдатов К. И. Некоторые вопросы определения собственных частот колебаний мостов применительно к проектированию // Вопросы статистики и динамики мостов: Межвуз. сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1987. – С. 94–103.
5. Солдатов К. И. Устойчивость сжатого пояса открытого моста // Динамика мостов и теория колебаний: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1975. Вып. 157. – С. 101–105.
6. Солдатов К. И., Бездетко П. В. Экспериментально-теоретическое исследование статической и динамической работы неразрезного сталежелезобетонного пролётного строения автодорожного моста // Вопросы прикладной механики мостов. Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1969. – С. 120–128.
7. Солдатов К. И., Распопов А. С. Об одном подходе к определению параметров свободных колебаний пролётных строений со сквозными фермами // Вопросы статической и динамической работы мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ. – Д., 1989. – С. 54–56.
8. Солдатов К. И., Распопов А. С. Свободные колебания неразрезных ферм железнодорожных мостов // Вопросы прикладной механики мостов: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1969. – С. 47–53.
9. Яковлев Г. Н., Солдатов К. И., Галушко В. Г. К вопросу о свободных пространственных колебаниях виадуков // Динамика мостов и теория колебаний: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1975. Вып. 157. – С. 52–56.
10. Солдатов К. И., Кисляк В. П. Исследование динамической работы временных железнодорожных мостов // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ. – Д., 1979. Вып. 220/23. – С. 117–122.
11. Солдатов К. И. Регулярные упругие модели в задачах динамики и устойчивости мостовых конструкций. Дис. … д-р техн. наук в форме научного доклада. – Д., 1993. – 73 с.
12. Солдатов К. И. К вопросу о собственных колебаниях мостовых конструкций на упругих опорах // Вопросы прикладной теории колебаний: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1972. – С. 97–119.
13. Солдатов К. И., Распопов А. С. Об одной модели динамического расчёта балок проезжей части железнодорожных мостов // Вопросы статической и динамической работы мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ. – Д., 1987. – С. 39–45.
14. Мосты и трубы. СНиП 2.05.03-84, – М., Государственный комитет по делам строительства, 1985. – 199 с.
15. Обследование и испытания автодорожного моста через р. Старый Днепр в г. Запорожье. Отчет по НИР, – Д., 1975. – 128 с.

Надійшла до редколегії 26.11.03.

УДК 624.2/8.002

К. И. СОЛДАТОВ (ДИИТ), В. И. МАДАТОВ (корпорация «Промстальконструкция»)

О СРОКЕ СЛУЖБЫ МАЛЫХ И СРЕДНИХ МОСТОВ НА ПЕРИФЕРИЙНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

У статті на підставі аналізу результатів обстеження великої кількості мостів пропонується абсолютно інший підхід до проектування, спорудження, утримання і терміну експлуатації периферійних мостів.

В статье на основании анализа результатов обследования большого количества мостов предлагается совершенно иной подход к проектированию, постройке, содержанию и сроку эксплуатации периферийных мостов.

Based on the results of examination of a large number of bridges, the article proposes a completely new approach to designing, construction, maintenance and service terms of periphery bridges.

Выводы данной статьи базируются на многочисленных [1; 2] материалах обследования малых и средних мостов (далее – МИСМ), построенных в послевоенное время на периферийных автодорогах юго-востока Европейской части СССР.

Известно, что финансирование строительства и эксплуатации МИСМ до сих пор осуществляется по остаточному принципу, хотя по общей протяженности и балансовой стоимости они составляют не менее 70 % от общего количества мостов.

Проектированием МИСМ, как правило, занимаются не головные проектные организации, а их филиалы, региональные неспециализированные проектные бюро и конторы, а в настоящее время – всякого рода ЧП, ООО и тому подобные фирмы, что обуславливает большое число неоптимальных решений и просто ошибок.

Кто, как и из чего строил МИСМ, зачастую невозможно установить, поскольку какая-либо исполнительная документация обычно отсутствует, а эксплуатационная – крайне скудна и нередко недостоверна. Обследование МИСМ при сдаче в эксплуатацию не предусмотрено нормами, а в дальнейшем проводится периодически комиссиями, в составе которых обычно нет обследователей-профессионалов.

Приняв на баланс такое сооружение, эксплуатационные службы в лучшем случае уделяют некоторое внимание состоянию элементов проезжей части моста (очистка тротуаров и проезда, ремонт и покраска перил и бордюров, ямочный ремонт покрытия, иногда наращивание бордюров). Происходит это не только из-за отсутствия финансирования, но и потому, что проще и выгоднее выполнить ремонт дороги, нежели ремонт моста.

Выполнение даже самых несложных ремонтных работ в условиях удаленности, отсутствия электроэнергии, воды и элементарных удобств, необходимость круглосуточной охраны механизмов и материалов и прочие неудобства делают их невыгодными не только для эксплуатационников, но и для подрядных ремонтно-строительных организаций. Таким образом, за время эксплуатации МИСМ практически не ремонтируются, а обследуются, как правило, после обнаружения какого-либо серьезного дефекта. В итоге, после примерно полувекового срока службы сооружение по результатам детального обследования обычно характеризуется следующим среднестатистическим комплексом дефектов, условно подразделяемым по времени их появления на три группы.

В первую группу входят дефекты, возникшие на стадии проектирования и строительства:

– неоптимальное проектное решение, обусловленное ограниченным финансированием, и поэтому отсутствием выбора типа и материала несущих конструкций, диктатом подрядчика, а иногда и отсутствием должных профессиональных навыков;

– использование некондиционных железобетонных конструкций, сбываемых заводами стройиндустрии на периферийные МИСМ в соответствии с остаточным принципом;

– применение в качестве несущих конструкций бывших в употреблении: металлопроката, рельсов, труб, элементов старых ферм и т. п.;

– сверхнормативные отклонения голов свай или стоек от проектных значений, наклоны свай или стоек;

– ошибки в разбивке осей опор и как следствие – нарушение допусков в опирании балок на ригеля опор, нарушение полноценности поперечного объединения балок по стыкам в уровне диафрагм и плиты;

– применение в условиях стройплощадки низкомарочного бетона, укладка его в любое время года без должного вибрирования и соблюдения требуемой нормами толщины защитного слоя;

– некачественное мощение конусов или пренебрежение укрепительными работами и расчисткой русла от остатков низководных насыпей подходов к котлованам опор или элементов ранее существовавших мостовых переходов;

– некомплектная и недостоверная исполнительная документация.

Заметим, что основной причиной появления дефектов I группы является некачественное выполнение работ, обусловленное монополизмом подрядчика и отсутствием действенного механизма материальной ответственности за некачественную работу.

Во вторую группу входят дефекты, возникшие на стадии эксплуатации [3]:

– русловые процессы (заиление, зарастание камышом, захламление мусором, стоками; подмывы откосов, откосных крыльев или обращенных к реке частей устоев моста);

– размывы конусов или откосов насыпей подходов из-за пренебрежения организацией водоотвода с поверхностей подходов к мосту;

– повреждение защитного слоя и рабочей арматуры свай (стоек, тела промежуточных опор) в зоне переменного уровня воды;

– активное разрушение бетонных поверхностей на фасадах моста с обнажением и коррозией арматуры из-за совместного воздействия атмосферных осадков, потеков с тротуаров и солнечной радиации;

– удары по нижним граням балок путепроводов над автопроездами, возникающие из-за нарастающего сокращения вертикального габарита в результате периодических укладок новых слоев покрытия под путепроводом и приводящие в начале к сколам нижних ребер, а в дальнейшем – к серьезным деформациям с разрывом несущей арматуры;

– многократное увеличение слоев дорожной одежды из-за ремонтов покрытия на мосту, сопровождающееся уменьшением высоты бордюров, заглушкой водоотводных трубок, деформационных швов и увеличением постоянных нагрузок на несущие конструкции моста;

– замусоривание у бордюров и на обочинах подходов, способствующее застаиванию воды в пределах проезжей части моста;

– многократные повреждения перильных ограждений и тротуаров в результате ДТП, учащающихся по мере уменьшения высоты бордюров;

– установка ограждений проезжей части, как правило, малоэффективных и ухудшающих безопасность движения пешеходов;

– просадки проезжей части на участках сопряжения мостов с насыпями в результате уплотнения грунта за устоями или его вымывания с просадкой или изломом переходных плит;

– отсутствие необходимых мероприятий по регулированию условий движения в зоне мостового перехода (наличие требуемых нормами дорожных знаков, разметки проезжей части, ограждений на подходах и мосту, соблюдение условий видимости путем контроля за насаждениями в зоне подходов и т. п.);

– отсутствие эксплуатационной документации.

В третью группу входят недостатки, обусловленные пересмотром норм проектирования, изменением интенсивности движения, увеличением числа большегрузных автомобилей, повышением в связи с этим категории автодороги. За время существования моста в рассматриваемый нами срок 50 лет нормы проектирования мостов менялись, по меньшей мере трижды (так, нормы СН-200-62 просуществовали почти 25 лет с 1962 по 1986 гг.), и теперь основные его параметры – габарит проезда, расчетные вертикальные нагрузки, высота ограждений проезжей части и другие не соответствуют действующим ныне нормативам, поэтому недостатки третьей группы обычно характеризуют термином «моральный износ».

По совокупности перечисленных выше дефектов техническое состояние такого среднестатистического сооружения, как правило, оценивается как неудовлетворительное, так как несмотря на то, что резервы несущей способности еще не исчерпаны, безопасность движения уже давно не обеспечивается, т. е. моральный износ превалирует над физическим. Подобное явление отмечается и в железнодорожных железобетонных пролетных строениях [4].

Капитальный ремонт или реконструкция такого моста технически возможны, но, как правило, экономически нецелесообразны, а фактически невозможны из-за отсутствия средств и подрядной организации, которая взялась бы за ремонт «неудобного» сооружения. В итоге, если средства изыскиваются, то рядом с мостом, которому настоящий хозяин нашел бы способ продлить жизнь, начинают строить новый мост, а старый просто забрасывают, что способствует появлению новой проблемы – загрязнение окружающей среды, не считая такого отрицательного побочного эффекта, как ухудшение усло-

вий пропуска паводковых вод. В практике строительства известны примеры целенаправленного создания неремонтопригодных инженерных сооружений с заданным сроком службы. Таковы, например, металлоконструкции морских нефтяных платформ, имеющих плановый срок службы 35 лет. Защита металлоконструкций от коррозии здесь выполнена на таком уровне, что окраска конструкций не требуется в течение всех 35 лет. На лесовозных дорогах Аляски и Канады железнодорожные мосты сооружаются из инвентарных конструкций с учетом их разборности для повторного использования через 15 лет службы. В отечественной практике случайного создания неремонтопригодных сооружений большое распространение получили жилые пятиэтажные дома серии 1-335 («хрущевки»), которые нуждаются в реконструкции или полной замене через 35…40 лет после постройки при нормативном сроке службы 100 лет [5].

Резюмируя вышеизложенное, считаем, что в силу ряда причин, основной из которых является нехватка средств, МИСМ следует отнести к категории условно неремонтопригодных инженерных сооружений и, поскольку в ближайшие десятилетия ожидать кардинального изменения в этой области не приходится, следует исходить из сложившейся практики финансирования, когда денег хватает только на строительство, а на ремонт и реконструкцию их уже нет.

Поэтому строящиеся МИСМ должны обладать таким набором качеств, которые позволят эксплуатировать их без капитального ремонта в течение гарантированного срока службы длительностью 25…35 лет. Предлагаемый диапазон определяется оптимальным соотношением морального износа функциональных потребительских свойств [6; 7] и физического износа несущих конструкций МИСМ [8; 2].

Заложить в них эти качества можно путем введения в действующие (или перспективные) СНиПы таких пунктов:

– подвижные нагрузки и габариты – в увязке с нормами Евросоюза [9];

– отверстие моста – на расход 4 % повторяемости, но с учетом заиления или карчехода (расчет отверстия с применением метода регрессионного анализа [10];

– исключение обособленных тротуаров и водоотводных трубок как очагов развития дефектов; отвод воды с моста и подходов через лотки на откосах насыпей подходов, исключающий прямое попадание воды с моста в водоток [11];

– проезжая часть и тротуары в одном уровне из гидрофобного [12] армированного цементобетона большой (15 см и более) толщины, включенного в совместную работу с главными балками [13];

– исключение деформационных швов или устройство их по типу закрытых, продление плиты проезжей части за устои (т. н. температурная неразрезность [14]);

– внедрение новых типов металлических, сталежелезобетонных [15] и облегченных сборно-монолитных железобетонных несущих конструкций для пролетных строений и опор [16], имеющих полноценную антикоррозионную защиту [17] и стыковые узлы, предусматривающие обязательную возможность разборки конструкций для повторного использования;

– внедрение пропитанной качественной древесины для строительства МИСМ в соответствующих регионах [18];

– удлиненные тротуарные консоли или (и) навесные декоративные панели для защиты фасадных поверхностей моста и закрытия коммуникаций;

– сменные блоки для защиты от ударов по несущим балкам в путепроводах над автопроездами;

– ограждения проезжей части на мосту и подходах должны располагаться на равных (в плане) расстояниях, а их конструкции должны обеспечивать легкую замену деформированных в результате ДТП элементов [19];

– защита свай (стоек, оболочек, тела промежуточных опор) в зоне колебания уровня воды еще в период строительства моста;

– укрепление конусов крупной каменной наброской с обязательным устройством рисберм из решетчатых конструкций [20];

– обязательная разборка остатков ранее существовавших мостовых переходов в зоне строительства нового МИСМ.

Построенное в соответствии с этими положениями сооружение детально обследуется специалистами независимой профессиональной организации. Обследование необходимо для фиксации начального технического состояния и составления паспорта МИСМ, после чего сооружение передается на баланс эксплуатационной организации, которая за время существования моста должна выполнять на нем работы, относящиеся только к номенклатуре текущего содержания [21].

Предлагаемый подход к проектированию, строительству и эксплуатации МИСМ был практически невыполним в условиях существо-

вавшей ранее системы инженерно-экономически-отраслевых взаимоотношений между проектантами, строителями, заказчиками (эксплуатационниками). Все стороны были заинтересованы в удорожании объекта, качество строительных работ при монополизме подрядчика было низким.

В связи с отходом от системы отраслевого монополизма, появлением рынка негосударственных проектно-изыскательских и строительных фирм и практики проведения тендеров на получение подряда на проектирование и строительство предлагается ввести в сферу хозяйственных отношений «заказчик – подрядчик» понятие гарантийного срока службы и при строительстве МИСМ длительность его принять равной 25…35 лет.

Проектанты и строители при этом обязуются быть гарантами, материально ответственными за безотказную работу моста с момента сдачи его в эксплуатацию и до истечения гарантийного срока. Незадолго до окончания гарантийного срока проводится еще одно детальное обследование сооружения с целью определения возможности:

– продления срока службы на указываемый в заключении срок, при этом должен быть разработан механизм материального поощрения подрядчиков и эксплуатационников;

– продления срока службы путем выполнения капитального ремонта или реконструкции;

– строительства нового моста с обязательным использованием несущих конструкций существовавшего моста.

Работы по капитальному ремонту, реконструкции или строительству нового сооружения целесообразно поручать прежним подрядчикам.

Для оценки экономического эффекта приведенных выше предложений они сведены в таблицу, где сопоставляются по принципу сравнения с сооружением-аналогом, общая стоимость которого принимается за 100 %. Экономический эффект приводится в процентах от стоимости аналога, при этом знак плюс (+) означает удешевление, а знак минус (–) – удорожание по сравнению с аналогом. Анализ приведенных в таблице данных позволяет говорить о наличии значительного положительного экономического эффекта, при этом не поддается количественной оценке величина положительного эффекта от улучшения качества подрядных работ, также от улучшения комплектности, достоверности и сохранности исполнительной и эксплуатационной документации.

Таблица

Элементы мостового перехода и виды работ

Элементы мостового перехода и виды работ	Мост-аналог	Мост с учетом предложений	+% – –%	Экономический эффект
1	2	3	4	5
Отверстие моста	Расчет на расход 2 % повторяемости	Расчет на расход 4 % + + карчеход или заилевание	+20	Уменьшение длины моста
Подвижные нагрузки	Н13 и НГ60 или Н30 и НК-80	А14 + Еврокод 1991-3	–20	Усиление несущих конструкций
Несущие конструкции опор и балок	Сборно-монолитные железобетонные неразборные	Металлические, сталежелезобетонные, сборно-монолитные плитные, железобетонные разборные	–20	Удорожание за счет применения металла
Тротуарные блоки	Сборные железобетонные конструкции	–	+10	За счет исключения этих элементов из видов работ
Водоотводные трубки	Чугунные трубки	Указанные элементы исключены		
Деформационные швы	Латунные компенсаторы			
Оклеенная гидроизоляция	Рулонная, 3 слоя с битумом			
Сточный треугольник	Тощий бетон 2…12 см			

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
Защитный слой	Цементно-песчаный раствор, сетка	Гидрофобный армированный цементобетон слой 15 см включен в работу с главными балками	+20	За счет увеличения несущей способности ПС путем включения плиты в совместную работу
Асфальтобетон	Мелкозернистый асфальтобетон	–		
Подрядная строительная организация	Некачественная работа является причиной многочисленных дефектов. Подрядчик выполняет только новое строительство, мост сдает с дефектами	Гарантийный срок диктует высокое качество. Уменьшение веса монтажных элементов упрощает транспортировку и монтаж. Подрядчик выполняет не только строительство, но и капремонт, реконструкцию	+20	Высокое качество, сокращение трудозатрат за счет исключения многих видов работ
Текущее содержание	Мероприятия согласно нормативам	Мероприятия согласно нормативам	–	–
Ремонт средний		Нет необходимости	+10	Экономия на ремонтах
Ремонт капитальный	В исключительных случаях	Нет необходимости в течение гарантированного срока	+20	Экономия на капремонте
Реконструкция	В исключительных случаях, так как нет средств и нет подрядчиков	Через 25 лет эксплуатации, при необходимости выполняет тот же подрядчик	–	–
Обследование	Как правило, качественно, ни разу	Не менее двух раз профессионалами	–15	Удорожание – стоимость двух обследований
Окончание срока службы сооружения	Через 50 лет после строительства полуразрушенное сооружение забрасывается, ухудшая экологию и гидрологию	Гарантированный срок 25 лет, есть шансы на продление до 35…45 лет; далее моральный износ обусловит реконструкцию или строительство нового сооружения с разборкой старого и использованием 75 % несущих конструкций	+50	Удешевление строительства нового моста за счет использования конструкций старого

Не приводится в данной статье и оценка положительного эффекта от применения системы страховых полисов, охватывающих весь период существования моста – от страхования строительных рисков в период строительства, до возмещения ущерба владельцу сооружения в случае возникновения одной из многих, оговоренных полисом ,критических ситуаций. Анализ этих и иных факторов экономического характера предполагается привести в другой статье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тумас Е. В., Рутгерс П. В. Состояние свайных и стоечных опор мостов // Автомобильные дороги. 1974. № 8.
2. Голубятников Е. И., Лантух-Лященко А. И. Проблемы надежности и долговечности мостов на дорогах городов и населенных пунктов Украины // Автомобильные дороги и дорожное строительство: Сборник № 64. – К.: НТУ, – 2002. – С. 59–65.
3. Черкасов К. А. О некоторых дефектах мостов, выявленных при обследовании // Автомобильные дороги. 1983. № 8. – С.
4. Мищенко М. И. Учет морального износа при реконструкции мостов // Будівництво: Зб. наук. пр. ДІІТу. – Д. Вип. 8, 2000.
5. Устинов В. П., Устинов Б. В. Анализ причин аварий современных конструкций // Будівництво: Зб. наук. пр. ДІІТу. – Д. Вип. 8, 2000.
6. Новые нормы расчета затрат на содержание мостов ФРГ Strasse – und Autobahn. 1979. № 11 – 30 с.

7. Робисон Р. Программа реконструкции автодорог и мостов // Гражданское строительство. 1987. № 11.
8. Васильев А. И. Системный подход к натурным исследованиям эксплуатируемых мостов // Автомобильные дороги и дорожное строительство: Сборник № 64. – К.: НТУ, – 2002. – С. 33–37.
9. Гладченко И. Ф., Лантух-Лященко А. И. Нормы проектирования автодорожных мостов должны отвечать требованиям современности // Строительство и стандартизация. 2001. № 1. – С. 9–12.
10. Optimal risk-based hydraulic design of bridges. Proseedings of the American Society of Civil Engineers. 1982. № 2 – P. 191–203.
11. Савина М. Ю. Учет экологических факторов при проектировании мостовых переходов // Автомобильные дороги и дорожное строительство: Сборник № 64. – К.: НТУ, – 2002. – С. 212–214.
12. Шкуратовский А. А., Колесник Ю. Р., Зема В. Е., Бура С. Ф. Повышение долговечности конструкций транспортных сооружений гидрофобизацией их поверхности // Автомобильные дороги и дорожное строительство: Сборник № 64. – К.: НТУ, – 2002. – С. 261–263.
13. Финкельштейн И. А., Мадатов В. И. О работе бездиафрагменного пролетного строения // Транспортное строительство. 1972. № 12 – С. 10– 14.
14. Опыт проектирования температурно-неразрезных пролетных строений // Труды СоюзДорНИИ. 1979. № 106.
15. Коваль П. М., Фаль А. Е., Лучко И. И. Применение сталежелезобетонных мостов в Закарпатской области // Автомобильные дороги и дорожное строительство: Сборник № 64. – К.: НТУ, – 2002. – С. 110–111.
16. Лукьяненко Е. П., Зорин З. Я., Кручинкин А. В., Полишко С. Н. Как решить проблему безопасности на путях сообщения Украины // Автомобильные дороги и дорожное строительство: Сборник № 64. – К.: НТУ, – 2002. – С. 169–171.
17. Ковалев П. М., Гладченко И. Ф., Москаленко В. Г. Типовое проектирование мостов – вчера и завтра // Строительство в Украине. 1999. № 6. – С. 16–18.
18. The timber bridge: an old and new concept. Giba S. D. Forest Products J. 1983. № 11–12. – P. 6–8.
19. Ковалев П. М. Несоответствие норм проектирования габаритов проезжей части мостов современным условиям движения автомобильного транспорта // Автомобильные дороги и дорожное строительство: Сборник № 64. – К.: НТУ, – 2002. – С. 119–122.
20. Львович Ю. М., Перевозников Б. Ф. Укрепление откосов решетчатыми конструкциями // Автомобильные дороги. 1978. № 4.
21. Страхова Н. Е. Планирование и классификация ремонтов мостов. Сборник № 59, 2000.

Поступила в редколлегию 29.12.03.

УДК 624.191.24

О. Л. ТЮТЬКІН, І. М. ПЕТРЕНКО (ДІІТ)

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИСКЛЕПІНЧАСТИХ СТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ СПЕЦИФІКИ ЇХ ПОВЕДІНКИ

У статті наводиться аналіз концепції оптимізації конструктивних елементів трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення. Проведена постановка задачі оптимізації, наведено її рішення та алгоритм її реалізації.

В статье приводится анализ концепции оптимизации конструктивных элементов трехсводчатых станций метрополитена глубокого заложения. Проведена постановка задачи оптимизации, приведено ее решение и алгоритм ее реализации.

The article provides the analysis of optimization concept of constructive elements in three-vaulted deep contour underground stations. Statement of the optimization task has been performed; its solution and algorithm of its realization have been presented.

Питання визначення оптимальної конструкції, виходячи із концепцій механіки підземних споруд чи геомеханіки, мало досліджене та практично не розроблене. Такий стан питання мотивований його складністю, недостатньою повнотою інформації про систему, що оптимізується, хоча спроби деяких авторів [1; 2] дуже інтересні та перспективні в економічному відношенні. Питання оптимізації у цьому ракурсі стає першорядним, але потребує всесторонннього наукового обґрунтування та апробації у зв'язку з високою відповідальністю за підземну споруду.

Перш ніж перейти до авторського бачення задачі оптимізації, визначимо критерій оптимальності, яким будемо оперувати у подальшому. Специфіка цього терміну така, що він є за своїм змістом економічною категорією та виходить за межі чисто фізичних уявлень. Розробка цього критерію в наданій роботі мотивується тим фактом, що вартість матеріалів при будівництві станцій метрополітену глибокого закладення складає від 50 % та більше від загальної вартості будівництва [3]. Тому як критерій оптимальності з найбільш розповсюджених (мінімум вартості, мінімум ваги, мінімум математичного очікування витрат на конструкцію, мінімакс витрат, принцип раціональності конструкції тощо) оберемо мінімум вартості. Такий критерій оптимальності універсальний для всіх видів споруд, і тому, оскільки він надто широкий, треба його достатньо конкретизувати для даного випадку. Логічним було б припустити, що прагнення зведення вартості до мінімуму відображається у зниженні ваги конструкції, тобто зменшенню об'єму будівельних матеріалів. Причому критерій оптимальності «мінімум ваги», який відповідає за створення оптимальної конструкції, у прихованому вигляді буде служити доповненням вимоги створення раціональної (рівноміцної) конструкції чи максимально наближеної до неї. Нестрога постановка останньої тези викликана специфікою роботи підземної споруди та недостатньою кількістю репрезентативної інформації про неї.

Критерій оптимальності записується як умова мінімуму функціонала, який визначає обраний критерій – мінімум ваги:

$$G = G\left(x, U\right) \to \min, \qquad (1)$$

де G – вага; $x = \left[x_1 \ldots x_n\right]$ – параметри проектування, наприклад, товщина перерізу елемента конструкції обробки станції метрополітену; $U = U_i\left(t\right)$ – функції проектування, наприклад, змінна товщина перерізу елемента конструкції обробки станції метрополітену; t – просторові координати.

Перш ніж перейти до видів обмежень у задачах оптимального проектування, перетворимо умову (1) у форму, яка більш підходить до умов обробок бокового та середнього тунелю трисклепінчастої станції глибокого закладення. Як відомо, для кожного конкретного випадку два розміри елемента обробки (блока чи тюбінга) – радіальний та вздовж станції – не змінюються. Відповідно мінімум ваги можна замінити мінімумом товщини, оскільки лише вона змінюється у процесі оптимізації. Умова (1) для мінімуму товщини буде виглядати так:

$$h(x,y) \to \min, \qquad (2)$$

де h – товщина елемента конструкції; x, y – просторові координати.

У задачах оптимального проектування до критерію оптимальності, звичайно, приходиться приєднати обмеження. Критерій оптимальності частіш усього пов'язується з обмеженнями за допомогою систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які з застосуванням математичних методів дозволяють отримати оптимальне рішення. Через те що основним видом отримання даних про існування системи «кріплення-масив» є розрахунок на міцність, то буде потрібно виконання у кожній точці тіла умови:

$$F\left(\sigma_{ij}\right) \le 0, \qquad (3)$$

в якій вид функції $F\left(\sigma_{ij}\right)$ залежить від фізичних властивостей матеріалу та від тензору напружень σ_{ij}. Така умова називається обмеженням по міцності.

Другим видом обмеження є «обмеження поперечних перерізів» (за Рожвани) [4]. Причому для спрощення постановки задачі будемо застосовувати простіший його різновид – встановлення верхньої та нижньої межі перерізу:

$$h_{\min} \le h \le h_{\max}, \qquad (4)$$

$$h \in H, \qquad (5)$$

де h – товщина перерізу, що змінюється; $h_{\min}$ – нижня межа, у випадку проектування блоків (тюбінгів) приймається 0,15 м із умови армування; $h_{\max}$ – верхня межа, у загальному випадку обмеження на неї не накладається, але із раціональних міркувань, які не дозволяють звести задачу оптимізації до абсурду, $h_{\max} = 1{,}0$ м.

Вираз (5) свідчить: змінна товщина елемента h належить до множини товщин H, причому задача спрощується, трансформуючись у випадок знаходження лише оптимальної товщини, хоча аналіз просторового розрахунку станції метрополітену і перегінного тунелю показує, що і поздовжній розмір елементу b (вздовж станції) також впливає на оптимальність конструкції. Але у цій роботі розгляд наданого факту не акцентується через і так складну постановку задачі. У подальшому умова (5) опускається через логічне розуміння належності товщини h до множини товщин H.

Важливо відмітити, що у постановці задачі оптимізації, яка запропонована авторами, буде враховуватися припущення про роботу системи у непружній області, оскільки припущення про роботу лише у пружній області призводить до перевитрат у порівнянні з тим розрахунком, який враховує появу непружних (пластичних чи пов'язаних з реологічними явищами) деформацій. Відмічено також, що конструкція, проектована за умови роботи у непружній стадії, не може бути не кращою, ніж проектована у пружній області [5; 6].

Постановка задачі для оптимізації геометричних розмірів (товщини) обробки бокових і середнього тунелів станцій метрополітену пілонного або колонного типів надається авторами у вигляді:

$$h(V) \to \min; \qquad (6)$$

$$\sigma(V) \le \left[\sigma_{\text{р}}\right]; \qquad (7)$$

$$h_{\min} \le h(V) \le h_{\max}; \qquad (8)$$

$$V \subseteq \Omega, \qquad (9)$$

де $h(V)$ – змінна товщина обробки; $\sigma(V)$ – напруження у перерізі, який характеризується товщиною $h(V)$; $\left[\sigma_{\text{р}}\right]$ – міцність бетону на розтяг; V – деякий набір блоків із завданими перерізами, який належить множині блоків Ω (а точніше є підмножиною множини Ω); позначки умови (8) розглядалися вище.

Вербально постановка задачі оптимізації ставиться так: треба знайти таку товщину блока $h(V)$, яка б була найменша і у той же час виконувалися умови (7) та (8), тобто напруження у блоці було б допустимим, а товщина блока не виходила за межі $h_{\min}$ та $h_{\max}$.

Слід зробити деякі зауваження щодо нерівності (7), яка свідчить, що при перевищенні напруженнями у деякому перерізі постійного значення міцності бетону на розтяг $\left[\sigma_{\text{р}}\right]$, переріз отримує тріщину і переходить у іншу стадію роботи, яку не можна припустити у підземному будівництві – бетон у тріщині не працює, арматура оголюється і починає працювати у пластичній стадії. Умова (7) не є остаточною умовою для оптимізації, оскільки $\sigma(V)$ може не перевищувати допустиме значення міцності бетону на розтяг. Ця умова є найбільш строгою і визначаючою тезу про недопущення виникнення тріщин в залізобетонних елементах у зоні розтягу

у випадку існування станції у полі складних гідрогеологічних умов.

«Транцедентність» функції $h(V)$ (у значенні взаємовпливу товщини обробки на НДС масиву та зміну НДС масиву і разом з тим НДС обробки) є серйозним обмеженням на використання математичних методів оптимізації, направлених на роботу з функцією мети. Тому можливе лише застосування методів оптимізації, які базуються на послідовному аналізі варіантів [7]. Послідовний аналіз варіантів важко назвати математичним методом оптимізації (немає пошуку явного чи неявного екстремуму), важко також його зведення до системи, але у той же час він простий і тісно пов'язаний з неформальними прийомами, які частіш усього приводять до рішення задачі оптимізації скоріше, чим класичні методи оптимізації, фактично засновані на «чистій» математиці. В обґрунтування вибору послідовного аналізу варіантів (ПАВ) свідчить і той факт, що варіація товщини $h(V)$ між межами $h_{\min}$ та $h_{\max}$ невелика, а також крок варіації розбиває величини товщин, які кратні 5 см через умови та можливість індустріального виробництва елементів станцій. Зрозуміло, що останнє міркування не досить строге, але й відхилення від нього не приведуть ситуацію з визначенням товщин до нескінченного числа кроків варіації.

Застосуємо для рішення задачі такий різновид ПАВ як пошук із зменшенням області пошуку [5]. Цей спосіб складається з використання процедур, які дозволяють за допомогою деяких оцінок відкинути допустимі рішення, серед яких нема оптимального. У міру виконання цих процедур відбувається поступове зменшення множини конкурентоспроможних варіантів. Насамкінець залишаються декілька варіантів, котрі порівнюються між собою. Графічне уявлення способу наведене на рис. 1. Підмножини ω_1, ω_2 множини Ω відкинуті після ПАВ у зв'язку з відсутністю у них оптимального рішення.

Підмножини, відкинуті після аналізу, слід докладно перевірити на наявність оптимального рішення, оскільки застосування цього методу може призвести до того, що може бути відкинута область, у якій є це рішення. У подальшому цей метод на практиці реалізується у наступному вигляді. Проводиться серія типових розрахунків станцій тільки з варіацією товщини бокових і середнього тунелів. За отриманими даними пружно-в'язко-пластичних розрахунків будуються пари:

$$h_1 - \Omega(\sigma)_{\text{ндс}\,1};\quad h_2 - \Omega(\sigma)_{\text{ндс}\,2};$$
$$h_1 - \Omega(\sigma)_{\text{ндс}\,3}; \qquad (10)$$
$$\ldots;$$
$$h_n - \Omega(\sigma)_{\text{ндс}\,n}.$$

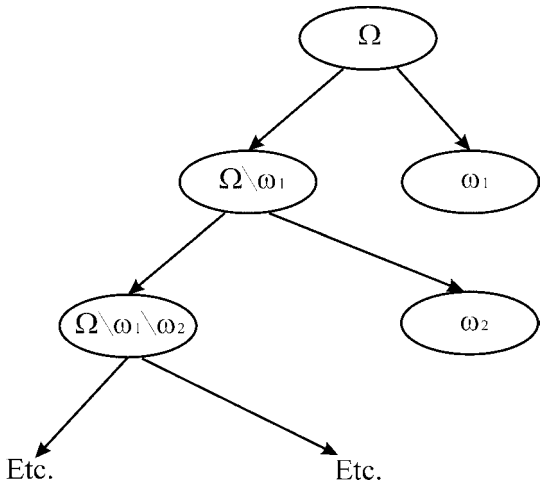


Рис. 1. Графічна схема пошуку зі зменшенням області пошуку

Під $\Omega(\sigma)_{\text{ндс}\,n}$ розуміється множина значень напружень у елементах обробок. Із цієї множини відбираються максимальні значення та проводиться перевірка умови (7). Умова (8) повинна виконуватися автоматично після визначення варіації товщини. Після ПАВ вибирається оптимальне рішення. На рис. 2. показана схема алгоритму знаходження оптимальних розмірів елементів конструкції.

Особливу увагу при рішенні задач оптимізації та розрахунків підземних споруд слід приділити об'єму та якості вхідної інформації. Це той випадок, коли інформація не буває надлишковою. Інформація повинна бути отримана безпосередньо з реальних умов існування підземної споруди. Тільки цей факт може бути запорукою отримання вірних результатів.

На підставі вищевикладених положень був проведений ряд розрахунків пілонної станції глибокого закладення ($H = 80$ м) у спондилових глинах з міцністю $f = 1\ldots1{,}5$, які відповідають інженерно-геологічним умовам Київського метрополітену. Постановка задачі – просторова, розрахунок виконується на підставі пружнопластичної моделі (відшукувалися зони пластичних деформацій) із заміною породного масиву спеціальними «ґрунтовими» стрижня-

ми. Визначали оптимальний поперечний переріз бічних і середнього станційних тунелів. За результатами, отриманими за допомогою комплексу SCAD, переріз, що застосовувався у розрахунку (500×1000 мм), можна зменшити на 19…25 % (відповідно 405×1000 мм; 375×1000 мм) без погіршення роботи станції (не перевищуючи розрахункову межу міцності). Економія бетону, отримана за результатами оптимізаційних розрахунків, в обсягах сучасного освоєння підземного простору України може дати стійкий економічний ефект (приблизно до 73 тис. грн на одну пілонну станцію у процесі проектування, розрахунку та будівництва).

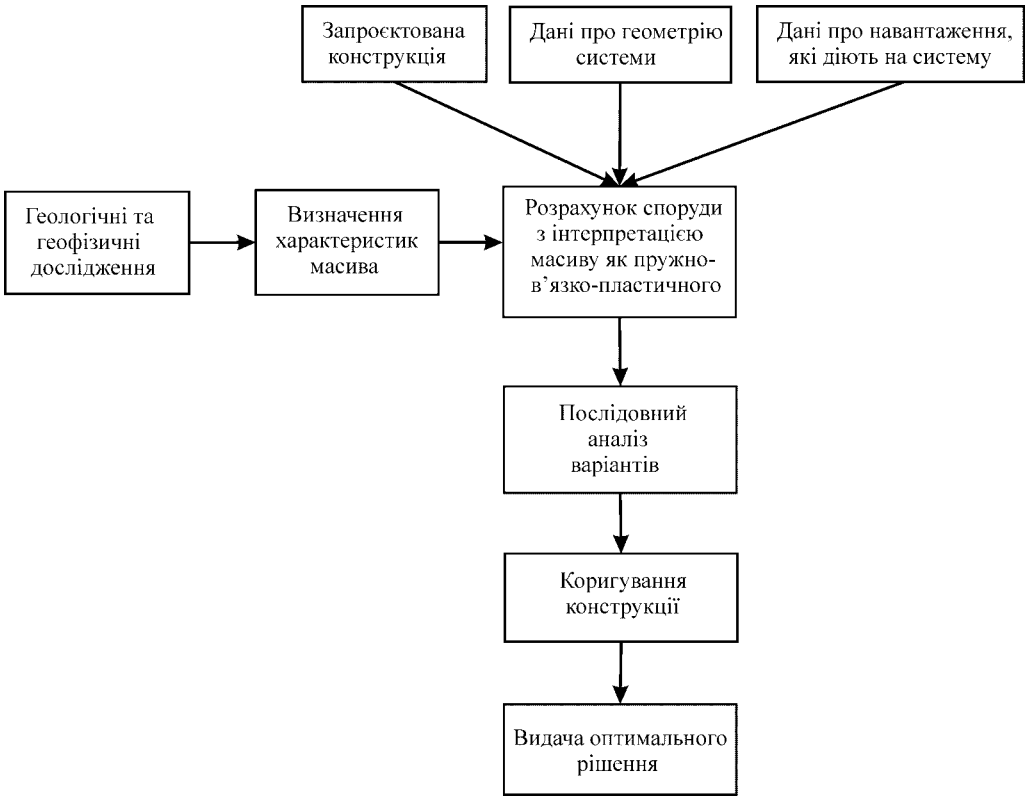


Рис. 2. Алгоритм оптимізації геометричних розмірів конструкції

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Меркин В. Е. Определение рациональных размеров целиков между станциями в пересадочных узлах метрополитена глубокого заложения / Сб. науч. трудов Всесоюзного науч.-исслед. ин-та транспортного строительства, 1968. – Вып. 25. – С. 46–55.
2. Дорман И. Я. Исследование и разработка сейсмостойких конструкций станций метрополитена из объемных элементов // Транспортное строительство. – 1980. – № 4. – С. 40–41.
3. Сборный железобетон в подземном строительстве / Безпалый В. И., Бялер И. Я., Карсницкий Н. Г., Сапрыкин Л. Д. – К.: Госстройиздат, 1961. – 248 с.
4. Рожваны Д. Оптимальное проектирование изгибаемых систем: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1980. – 316 с.
5. Рейтман М. И., Шапиро Г. С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел (постановки и способы решения задач оптимизации параметров элементов конструкций). – М.: Наука, 1976. – 258 с.
6. Абовский Н. П., Енджиевский Л. В. и др. Регулирование, синтез, оптимизация (избранные задачи по строительной механике и теории упругости): Учебное пособие для вузов. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. – 384 с.
7. Моисеев Н. Н. Методы оптимизации. – М.: Наука, 1978. – 351 с.

Надійшла до редколегії 02.03.03.

Наукове видання

В І С Н И К

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Випуск 3
Українською, російською та англійською мовами

Відп. за випуск *І. П. Корженевич*,
Комп'ютерна верстка *Я. І. Зайць,*
Коректори *Т. В. Щепоткіна*, *Т. В. Мацкевич*

ДК № 1315
Здано до набору 28.01.04. Підписано до друку 16.03.04. Формат 60х84 1/8.
Папір офсетний. Друк різограф. Умов. друк. арк. 20,3.
Обл.-вид. арк. 20,96. Тираж 150 прим. Замовлення № 3667.

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2

Друкарня Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2