

# ИЗВЕСТИЯ

№ 3(7)

2011

# Транссиб



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Галиев Ильхам Исламович** – главный редактор, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
  2. **Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, проректор по научной работе и инновациям ОмГУПС, д.т.н., профессор.
  3. **Володин Александр Иванович** – первый проректор ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ.
  4. **Бокарев Сергей Александрович** – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
  5. **Завьялов Александр Михайлович** – проректор по научной работе СибАДИ, д.т.н., профессор (Омск).
  6. **Каргапольцев Сергей Константинович** – проректор по научной работе ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
  7. **Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
  8. **Косых Анатолий Владимирович** – проректор по научной работе ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
  9. **Серенко Андрей Федорович** – проректор по научной работе ДВГУПС, д.т.н., доцент (Хабаровск).
  10. **Чугуй Юрий Васильевич** – зав. лабораторией конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Новосибирск).
  11. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – д.т.н., начальник НИЦ ОмГУПС (Омск).
- Комякова Ольга Олеговна** – ответственный секретарь, к.т.н., доцент ОмГУПС (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог

- Аркашев А. Е., Ларькин И. В. Моделирование взаимодействия токоприемника и контактной подвески с учетом отрывов полоза от контактного провода..... 2
- Жмудь Д. Д., Королев В. А. Методика расчета взаимодействия токоприемников с контактными подвесками на воздушных стрелках ..... 8
- Исмаилов Ш. К., Гателюк О. В., Талызин А. С. Исследование процесса ремонта колесных пар электровозов ВЛ10 методом имитационного моделирования ..... 19
- Кузнецов В. Ф., Шантаренко С. Г., Пономарев Е. В. Контактные напряжения в зубчатых колесах тягового редуктора колесно-моторного блока электровоза ..... 24
- Петроченко С. В., Федоров А. А. Поверхностное упрочнение рабочей поверхности коллекторов электрических машин постоянного тока методом ударно-акустической обработки ..... 29
- Сидоров О. А., Смердин А. Н., Жданов В. А. Расчет интегральных показателей качества токосъема с помощью ассоциативных экспертных нейронных сетей ..... 33
- Сидоров О. А., Ступаков С. А., Филиппов В. М. Моделирование износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта ..... 43
- Харламов В. В., Шкодун П. К., Афонин А. П. Диагностирование состояния коммутации коллекторных электродвигателей с использованием прибора ПКК-5М ..... 52

### Транспортная энергетика

- Карабанов М. А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов ..... 58
- Протченко А. В., Мухин В. А. Схема замещения коррозионной ячейки железобетонной опоры контактной сети ..... 67
- Сидорова Е. А., Давыдов А. И. Анализ эффективности применения рекуперативного торможения при проведении энергетического обследования объектов железнодорожного транспорта ..... 74
- Шерстобитов М. С., Лебедев В. М. Способы утилизации твердых бытовых отходов ..... 79

### Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Панюков А. Г. Подбор электронных компонентов для устройства предварительной обработки OFDM-сигналов ..... 85

### Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Запрудский А. А. Определение нагрузок на опорные конструкции контактной сети с учетом деформации стоек ..... 89
- Поздеев В. В., Крайнов В. В. Способы повышения взрывобезопасности при транспортировке взрывчатых веществ на железнодорожном транспорте ..... 100

- АННОТАЦИИ ..... 107

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ С УЧЕТОМ ОТРЫВОВ ПОЛОЗА ОТ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА

*Рассматривается модель взаимодействия токоприемника и контактной подвески с учетом отрывов полоза от контактного провода. Для уменьшения коэффициента отрывов предлагается оснастить токоприемник системой автоматического регулирования (САР) нажатия, содержащей датчик искрения.*

Эффективное функционирование и развитие железнодорожного транспорта, составляющего основу транспортной системы России, играют исключительную роль в создании условий для перехода на инновационный путь развития и устойчивого роста национальной экономики. В соответствии с федеральной целевой программой «Развитие транспортной системы России на 2010 – 2015 годы» необходимо решить задачи по созданию скоростного и высокоскоростного пассажирского движения и по обновлению парка пассажирского подвижного состава.

При реализации высоких скоростей движения проблема обеспечения надежного и качественного токосъема остается особенно актуальной во всем мире, одним из перспективных путей ее решения является разработка и совершенствование математических моделей взаимодействия токоприемника с контактной подвеской.

Модели взаимодействия токоприемников с контактными подвесками можно классифицировать по числу степеней свободы у токоприемника, по способу учета контактной подвески (с сосредоточенными или распределенными параметрами), по особенностям учета факторов, оказывающих механическое воздействие на токоприемник и контактную подвеску [1].

Токоприемник может быть представлен одно-, двух- или трехмассовой моделью, учитывающей поступательные и вращательные движения его элементов. Более точной является модель токоприемника, представляющая собой многотельную систему, полностью отображающую конструкцию и параметры отдельных тел токоприемника.

Модель контактной подвески с сосредоточенными параметрами содержит приведенные массы, упругие и демпфирующие элементы, характеристики которых получены экспериментальным путем. В таком виде расчетная схема подвески может быть использована лишь для исследования взаимодействия с одним токоприемником, так как не учитывает распространения продольных колебаний контактного провода. Кроме этого приходится постоянно доопределять характеристики упругих и демпфирующих элементов при необходимости учета нелинейной жесткости подвески.

При представлении контактной подвески моделью с распределенными параметрами чаще всего используются модели натянутой нити и модели стержня с учетом предварительного натяжения и изгибной жесткости. Модель нити используется достаточно широко благодаря сравнительной простоте процедуры численного решения уравнения колебаний. Модель стержня учитывает изгибную жесткость провода, но повышает порядок дифференциального уравнения и существенно усложняет процедуру решения.

Одним из основных допущений, часто принимаемых при исследовании взаимодействия токосъемных устройств, является то, что контактные элементы движутся безотрывно по контактному проводу, что позволяет не рассчитывать траектории движения контактного провода и контактных элементов в отдельности и не учитывать ударный процесс при соприкосновении контактного элемента с контактным проводом. Однако на практике наиболее опасным режимом токосъема являются отрывы полоза токоприемника от контактного провода и возникновение электрической дуги, которая ведет к таким негативным последствиям, как отжиг и пережог контактного провода и, как следствие, к обрыву проводов и поломке токоприемников. Следовательно, модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской должна описывать условия потери контакта между контактной подвеской и полозом токоприемника.

В Омском государственном университете путей сообщения ведутся работы по исследованию, моделированию и разработке устройств токосъема в рамках проекта «Разработка и организация высокотехнологичного производства нового магистрального токоприемника для применения на линиях с модернизированной инфраструктурой системы токосъема», реализуемого при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Для повышения качества токосъема путем стабилизации контактного нажатия и уменьшения коэффициента отрывов предлагается оснастить токоприемник САР нажатия. Регулирование нажатия токоприемника осуществляется по комбинированному принципу управления, объединяющему в себе программное управление по заданному закону и управление с обратной связью по нажатию и искрению токоприемника. Необходимость применения датчика искрения подтверждается результатами испытаний устройств токосъема на линии Москва – Санкт-Петербург, в ходе которых установлено, что интенсивное искрение возникает даже при небольшом среднеквадратичном отклонении контактного нажатия при различных скоростях движения электроподвижного состава. Характерными внешними факторами, вызывающими интенсивное искрение независимо от скорости движения и нажатия токоприемника, являются разрегулированная контактная подвеска, дефекты контактных вставок токоприемника и контактных проводов, гололедные образования на контактной подвеске. На основании сказанного выше предложена система регулирования (патент РФ №105862) [2], в качестве чувствительных элементов которой выступают датчик контактного нажатия и датчик искрения, а в качестве блока управления – регулятор, принцип работы которого основан на нечеткой логике (Fuzzy-регулятор) (рисунок 1).

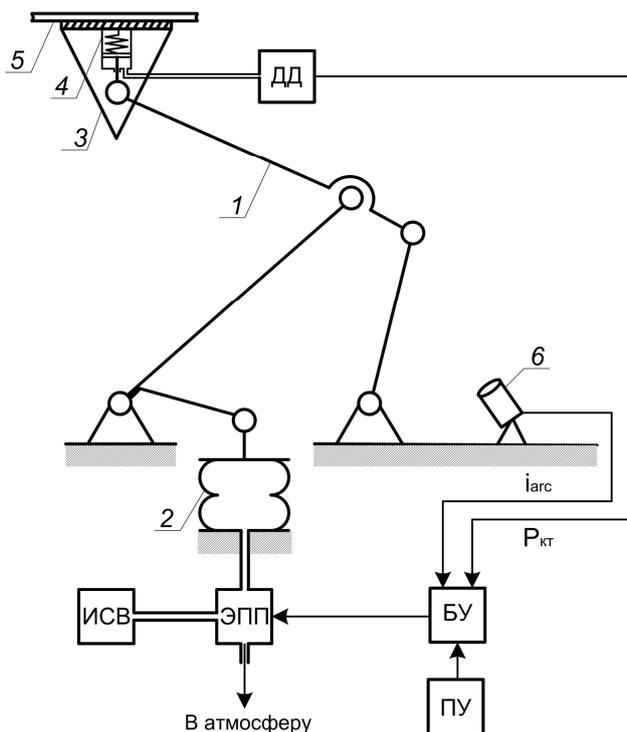


Рисунок 1 – Структурная схема САР нажатия токоприемника: 1 – рамы токоприемника;

2 – резинокордный элемент; 3 – полз токоприемника; 4 – датчик нажатия; 5 – контактный провод; 6 – датчик искрения; ДД – датчик давления;

БУ – блок управления; ИСКВ – источник сжатого воздуха; ПУ – пульт управления; ЭПП – электропневматический преобразователь

При подъеме токоприемника 1 (см. рисунок 1) сжатый воздух через ЭПП поступает в полость пневмопривода, выполненного в виде пневматического резинокордного элемента (РКЭ) 2. Полз токоприемника 3 оснащен демпфирующими элементами 4, выполняющими одновременно функции датчика контактного нажатия. При взаимодействии токоприемника с контактным проводом 5 изменение контактного нажатия ведет к изменению давления воздуха в пневматической магистрали, связанной с датчиком давления. Блок управления обрабатывает сигналы от датчика давления и датчика искрения 6 и формирует управляющее воздействие на электропневматический преобразователь в соответствии с заданным алгоритмом. Подъем и опускание токоприемника осуществляются через пульт управления, установленный в кабине машиниста. Датчик искрения основан на регистрации ультрафиолетового излучения, поскольку значительная часть энергии излучения, выделяемого электрической дугой, лежит в ультрафиолетовом диапазоне. Разработанный датчик искрения не реагирует на солнечный свет и источники искусственного освещения за счет узкого спектрального диапазона чувствительного элемента (220 – 280 нм).

Моделирование токоприемника, оснащенного САР нажатия, осуществляется в приложе-

нии Simulink среды Matlab, являющимся мощным средством обработки многомерных данных [3]. Целью исследования является оценка влияния предложенной САР нажатия на качество токосъема.

В предложенной модели взаимодействие токоприемника и контактной подвески реализовано в пакете физического моделирования Simmechanics приложения Simulink. Использование пакета Simmechanics позволяет создать механическую систему с применением модели твердого тела, осуществить анализ трехмерных моделей и объединить механические блоки с другими типами блоков приложения Simulink. Механическая система «токоприемник – контактная подвеска» моделируется в виде отдельных тел, имеющих массовые и инерционные характеристики. Данные о геометрических параметрах тел извлекаются из xml-файлов, полученных при их моделировании в программном средстве трехмерного проектирования SolidWorks, что позволяет визуализировать исследуемый процесс и упростить его восприятие (рисунок 2).

Контактная подвеска представлена одномассовой моделью с сосредоточенными параметрами. Влияние на токоприемник со стороны стрелы провеса контактного провода заключается в изменяющихся по длине пролета жесткости, массе и демпфировании контактной подвески при отсутствии под ним токоприемника.

В процессе моделирования взаимодействия токоприемника с контактной подвеской был реализован алгоритм, описывающий контакт между полозами токоприемника и элементами контактного провода. Блок вычисления и реализации силы взаимодействия представлен в виде подсистемы из блоков Body Sensor и Body Actuator (рисунок 3). Данные о перемещениях и скоростях из подсистем «контактная сеть» и «токоприемник» через блоки Body Sensor передаются в подсистему вычисления контактного нажатия «ForceLaw», с выхода которой величина силы нажатия передается обратно в подсистемы посредством блоков Body Actuator, осуществляя тем самым взаимное влияние подсистем.

Подсистема «ForceLaw» предназначена для вычисления нажатия токоприемника на контактный провод по следующему закону:

$$P_{kt} = \begin{cases} k(y_{п} - y_{кc}) + b(\dot{y}_{п} - \dot{y}_{кc}), & \text{если } y_{к} = y_{п}; \\ 0, & \text{если } y_{к} \neq y_{п}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $k$  и  $b$  – виртуальные жесткость и демпфирование, имитирующие контакт;

$y_{к}$  и  $\dot{y}_{к}$  – координата и скорость точки контакта;

$y_{п}$  и  $\dot{y}_{п}$  – координата и скорость полоза;

$y_{кc}$  – координата контактного провода.

Выражение 1 позволяет анализировать контакт полоза токоприемника с контактным проводом, что дает возможность оценивать качество токосъема по коэффициенту отрывов.

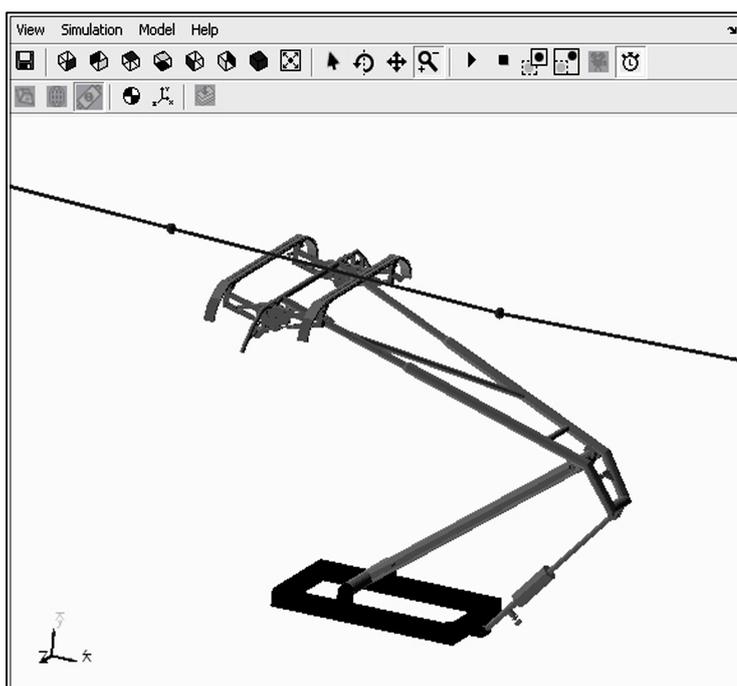


Рисунок 2 – Модель механической системы «токоприемник – контактная подвеска» в пакете Simmechanics

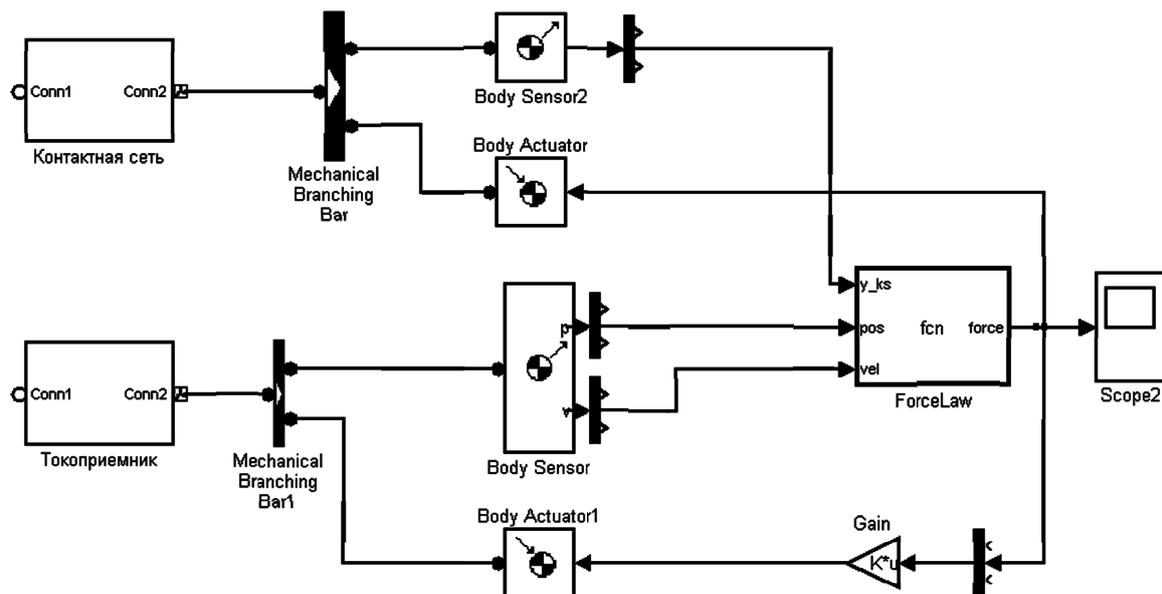


Рисунок 3 – Модель блока реализации взаимодействия токоприемника с контактной подвеской

Рисунок 4 поясняет принцип расчета контактного нажатия между приведенной массой контактной сети и ползком токоприемника.

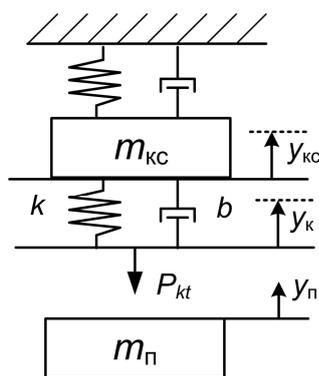


Рисунок 4 – Модель расчета контактного взаимодействия между контактной сетью и ползком токоприемника

При дальнейшем моделировании и исследовании САР нажатия в приложении Simulink описанная выше механическая система «токоприемник – контактная подвеска» представлена в виде одноименной подсистемы, как составной части САР нажатия.

Для анализа САР нажатия и оценки ее влияния на качество токосъема необходимо определить передаточные функции всех элементов системы.

Резинокордный элемент – колебательное звено, основными параметрами которого являются коэффициент усиления  $k_{PKЭ}$ , постоянная времени  $T_{PKЭ}$  и коэффициент демпфирования  $\xi_{PKЭ}$ :

$$W_{PKЭ}(p) = \frac{k_{PKЭ}}{T_{PKЭ}^2 \cdot p^2 + 2\xi_{PKЭ} \cdot T_{PKЭ} \cdot p + 1} \quad (2)$$

Электропневматический преобразователь имеет линейную зависимость выходного давления от входного электрического сигнала с коэффициентом усиления  $k_{ЭПП}$  и обратную связь по давлению воздуха.

Датчик нажатия, состоящий из демпфирующего элемента и преобразователя давления воздуха в электрический сигнал, является аperiodическим звеном, имеющим коэффициент усиления  $k_{ДН}$  и постоянную времени  $T_{ДН}$ :

$$W_{ДН}(p) = \frac{k_{ДН}}{T_{ДН} \cdot p + 1} \quad (3)$$

Датчик искрения принимается усилительным звеном с коэффициентом  $k_{ДИ}$ .

Поскольку взаимодействие токоприемника с контактной подвеской является сложным динамическим процессом, в котором необходимо учитывать нелинейность элементов токоприемника, аэродинамическое воздействие и другие стохастические процессы, то применение методов управления на основе нечеткой логики является актуальным для управления нажатием токоприемника.

Fuzzy – регулятор, используемый в САР нажатия, имеет два входа – отклонение контактного нажатия и искрение токоприемника – и один выход – управляющее нажатие токоприемника. Математическая модель регулятора, основанного на нечеткой логике, приведена в работе [4]. Моделирование САР нажатия токоприемника с Fuzzy-регулятором выполнено в пакете Fuzzy Logic Toolbox, входящем в состав системы Matlab.

Исследуемая модель, реализованная в приложении Simulink, представлена на рисунке 5.

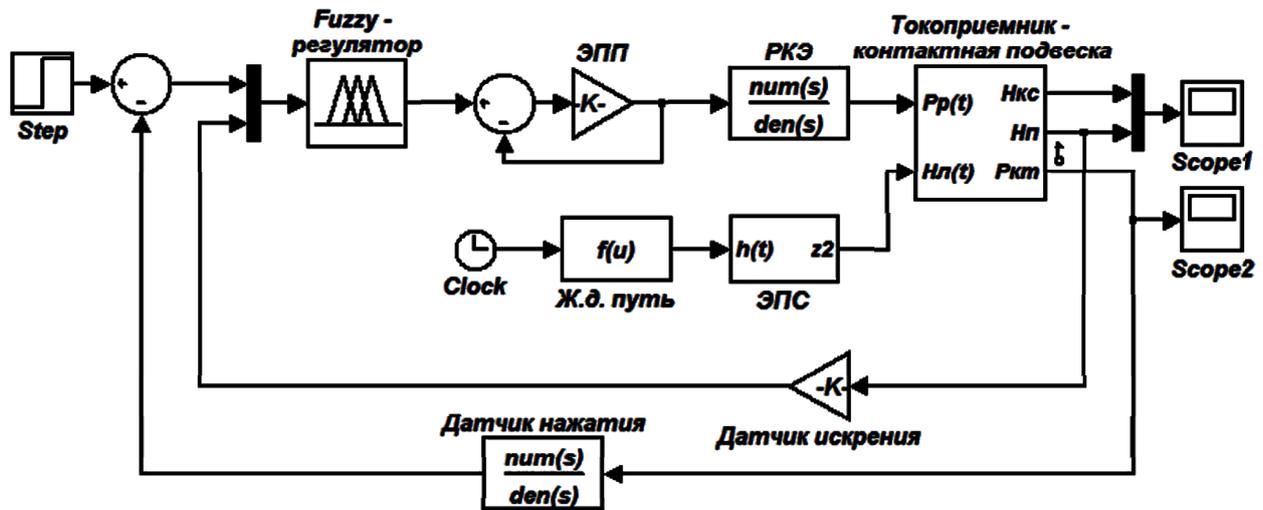


Рисунок 5 – Модель для исследования взаимодействия токоприемника, оснащенного САР нажатия, с контактной подвеской

С помощью разработанной математической модели выполнен расчет взаимодействия токоприемника с контактной подвеской и оценено влияние САР нажатия на качество токосъема.

На рисунке 6 представлены траектории движения контактного провода и полоза токоприемника, не оснащенного САР нажатия, а также нажатие в контакте при скорости движения электроподвижного состава 140 км/ч. На рисунке 7 изображены траектории движения контактного провода и полоза, а также нажатие токоприемника, оснащенного предлагаемой САР нажатия, при тех же условиях. Программное управление нажатием согласно заданному закону управления позволяет снизить среднеквадратичное отклонение контактного нажатия по пролетам контактной сети. Замкнутое управление с обратной связью по нажатию и искрению токоприемника позволяет при возникновении ненормального режима токосъема (выход нажатия за пределы заданного значения, интенсивное искрение) регулировать нажатие токоприемника как в большую, так и в меньшую сторону. САР нажатия не реагирует на единичные выбросы нажатия или искрения (рисунок 6, б), но при появлении тенденции к увеличению среднеквадратичного отклонения нажатия либо при интенсивном искрении в течение заданного времени повышает нажатие токоприемника (после четвертой секунды). В результате применение комбинированного принципа управления приводит к улучшению двух важнейших интегральных показателей качества токосъема, таких как среднеквадратичное отклонение нажатия и коэффициент отрывов токоприемника.

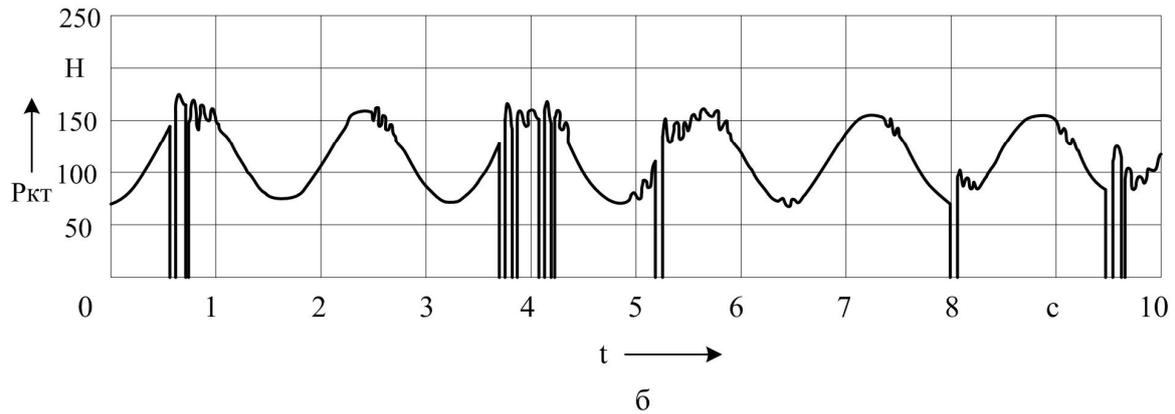
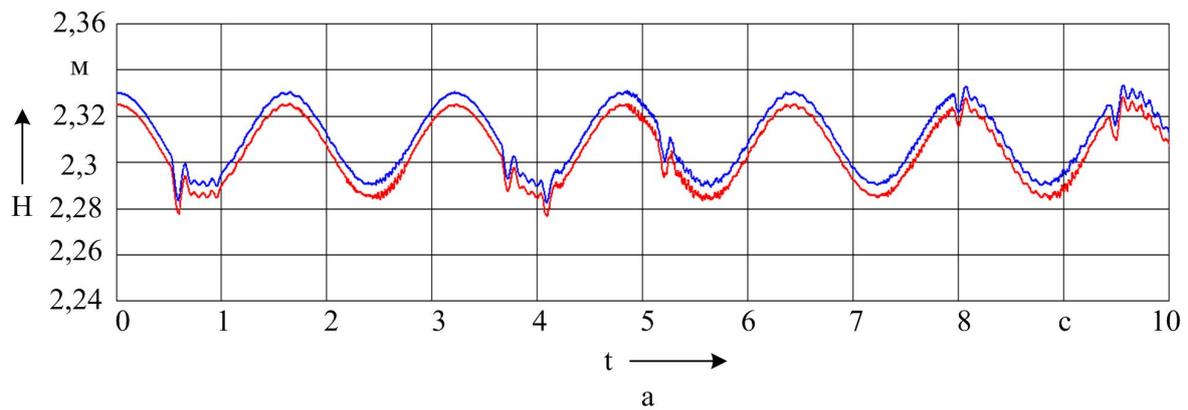


Рисунок 6 – Траектории движения контактного провода и полоза (а) и контактное нажатие (б) токоприемника, не оснащенного САР нажатия

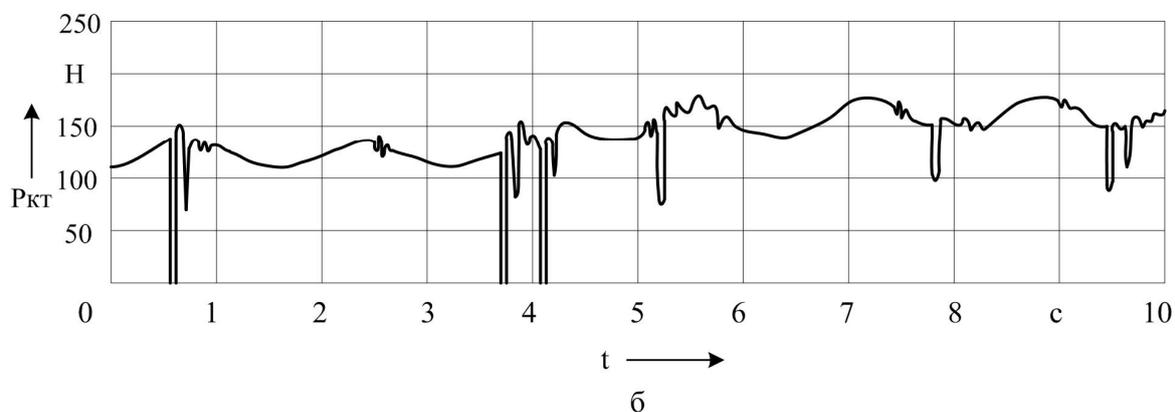
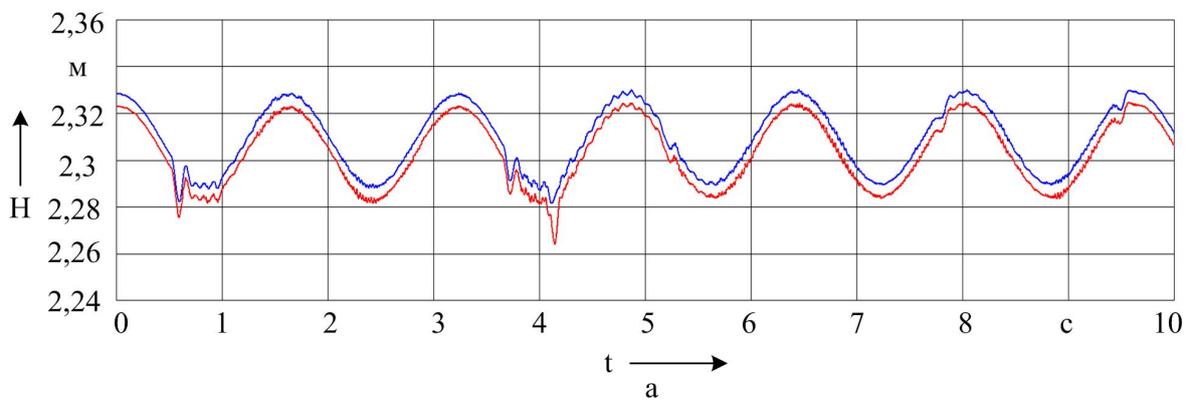


Рисунок 7 – Траектории движения контактного провода и полоза (а) и контактное нажатие (б) токоприемника, оснащенного САР нажатия

Таким образом, разработана математическая модель взаимодействия токоприемника и контактной подвески с учетом отрыва полоза токоприемника от контактного провода. Для повышения качества токосъема предлагается использование САР нажатия токоприемника, основанной на комбинированном принципе управления, содержащей датчик искрения, датчик нажатия и Fuzzy-регулятор. Результаты моделирования показали эффективность применения предлагаемой САР нажатия для уменьшения коэффициента отрыва токоприемника.

## Список литературы

1. Сидоров, О. А. Системы контактного токосъема с жестким токопроводом: Монография [Текст] / О. А. Сидоров. – М.: Маршрут, 2006. – 119 с.
2. Пат. № 105862 на полезную модель (РФ), МПК В 60 L 5/00. Токоприемник электроподвижного состава [Текст] / О. А. Сидоров, А. Е. Аркашев, И. В. Ларькин, С. Ю. Сосновский. Заявлено 11.01.2011; Опубл. 27.06.2011 // Открытия. Изобретения. 2011. № 2011100366/11. – 2 с.
3. Щербаков, В. С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде MATLAB и SIMULINK. Учебное пособие [Текст] / В. С. Щербаков, А. А. Руппель, В. А. Глушеч / Сибирская автомобильно-дорожная акад. – Омск, 2003. – 160 с.
4. Ларькин, И. В. Система регулирования нажатия токоприемника, основанная на нечеткой логике [Текст] / И. В. Ларькин, С. Ю. Сосновский // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы XI междунар. науч.-практ. конф. / Южно-российский гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, 2011. – С. 137 – 141.

УДК 621.332.531

Д. Д. Жмудь, В. А. Королев

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ С КОНТАКТНЫМИ ПОДВЕСКАМИ НА ВОЗДУШНЫХ СТРЕЛКАХ

*В статье рассмотрена методика расчета взаимодействия токоприемников с контактными подвесками на усовершенствованных воздушных стрелках контактной сети. Изложенная методика и разработанная программа позволяют на стадии проектирования прогнозировать характер взаимодействия при различных значениях параметров системы.*

Исследование взаимодействия токоприемника с контактной подвеской в зоне воздушных стрелок только экспериментальным путем связано со значительными затратами и объемом работ. Теоретические методы исследования, основанные на моделях с распределительными параметрами, приводят к громоздким вычислениям. На наш взгляд, наиболее целесообразным путем решения поставленной задачи является оптимальное сочетание теоретических и экспериментальных методов исследования. Для этой цели подходит двухмассовая дискретная модель, приведенная на рисунке 1.

Вариант модели токоприемника с несинхронизированными каретками отличается тем, что учитывает возможность перекоса полоза токоприемника под действием сил контактного нажатия при взаимодействии с контактными подвесками на воздушной стрелке [1, 2]. Это можно считать положительным фактором для описания процессов, происходящих при взаимодействии с движущимся токоприемником.

При взаимодействии токоприемника с контактной подвеской в зоне воздушной стрелки можно выделить четыре различных режима взаимодействия:

# Подвижной состав железных дорог

- 1) токоприемник взаимодействует со вторым контактным проводом и не касается первого – режим  $P_1$ , приведенный на рисунках 2, а; 3, а; 3, б;
- 2) токоприемник взаимодействует одновременно с двумя контактными проводами – режим  $P_2$ , приведенный на рисунке 2, б;
- 3) токоприемник взаимодействует с первым контактным проводом и не касается второго – режим  $P_3$ , приведенный на рисунке 2, в;
- 4) токоприемник и контактная подвеска колеблются независимо – режим  $P_4$ , приведенный на рисунках 2, г; 3, в.

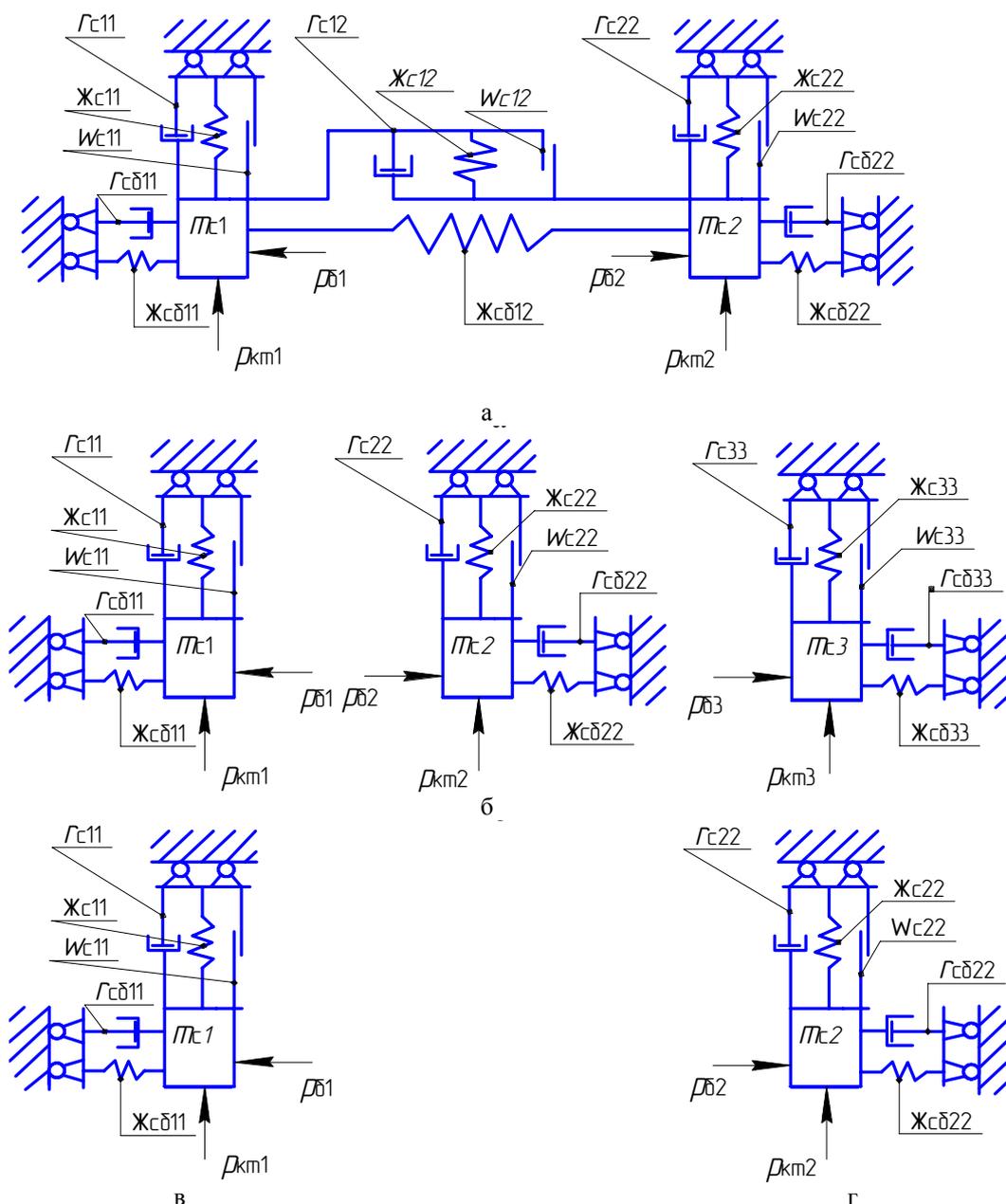


Рисунок 1 – Модели контактных подвесок на воздушной стрелке: а – с пересечением контактных проводов (BC-1); б – без пересечения контактных проводов с дополнительной контактной подвеской (BC-2); в, г – без пересечения контактных проводов и без дополнительной контактной подвески (BC-3)

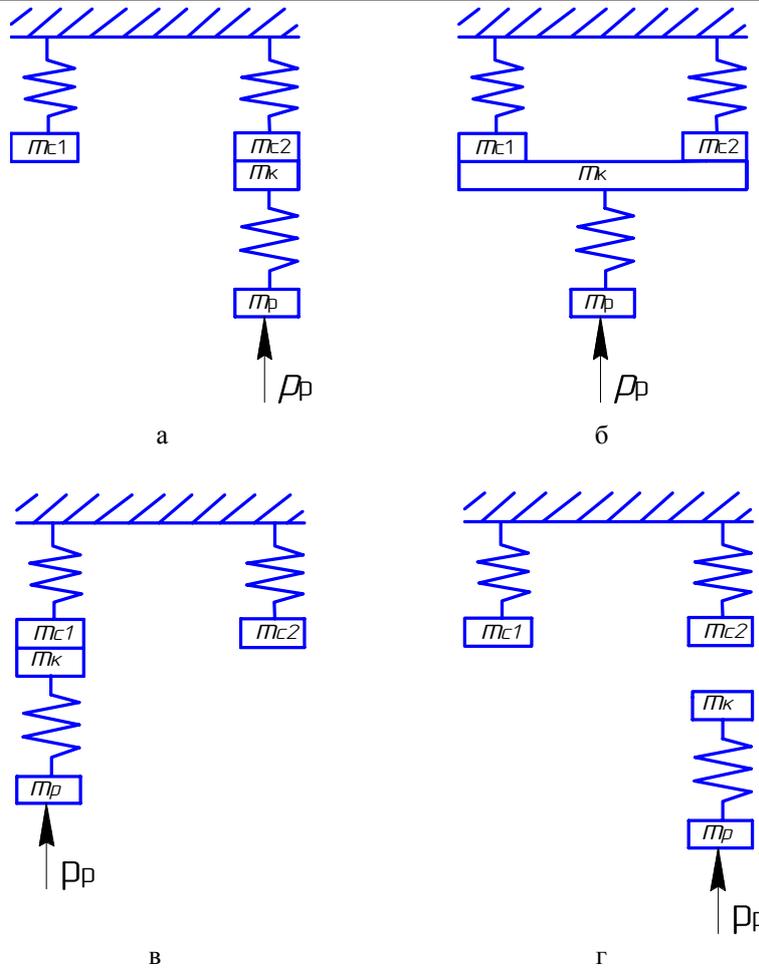


Рисунок 2 – Модели для расчета взаимодействия токоприемника с контактными подвесками на ВС-2

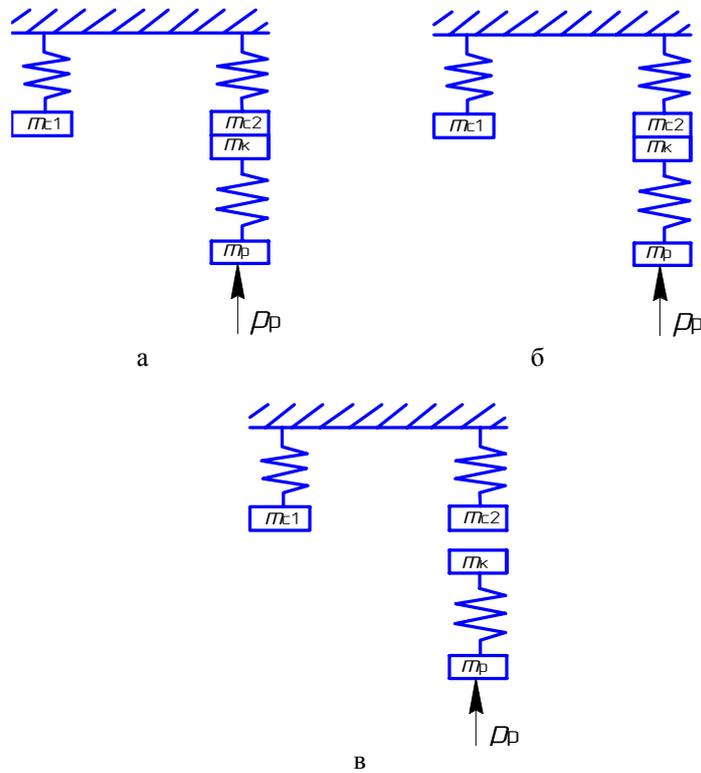


Рисунок 3 – Модели для расчета взаимодействия токоприемника с контактными подвесками на ВС-3

Рассмотрим более детально режимы взаимодействия.

В случае режима  $P_1$  справедлива следующая связь между величинами  $H_k$  и  $H_{c2}$ :

$$H_{c2} = H_k + H_{пол}^{(2)}. \quad (1)$$

Система дифференциальных уравнений, которые описывают колебания в режиме  $P_1$ , имеет вид:

$$\begin{cases} m_{c1}(x)v^2 \frac{d^2 H_{c1}}{dx^2} = -F_{cc} \left( H_{c1}, H_{c2}, \frac{dH_{c1}}{dx}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) - F_{c1} \left( H_{c1}, \frac{dH_{c1}}{dx} \right); \\ (m_{c2}(x) + m_k) \frac{d^2 H_k}{dx^2} = F_c \left( H_{c1}, H_{c2}, \frac{dH_{c1}}{dx}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) - F_{c2} \left( H_{c2}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) + \\ + F_k \left( H_k, H_p, \frac{dH_k}{dx}, \frac{dH_p}{dx} \right) + P_{вл} - m_{c2}(x)v^2 \frac{d^2 H_{пол}}{dx^2}; \\ m_p v^2 \frac{d^2 H_p}{dx^2} = -F_k \left( H_k, H_p, \frac{dH_k}{dx}, \frac{dH_p}{dx} \right) + P_{вр} + F_p \left( H_p, \frac{dH_p}{dx} \right). \end{cases} \quad (2)$$

Силу контактного нажатия  $P_{кт}$  можно определить следующими двумя способами:

$$P_{кт} = -m_k v \frac{d^2 H_k}{dx^2} + F_k \left( H_k, H_p, \frac{dH_k}{dx}, \frac{dH_p}{dx} \right) + P_{вл}; \quad (3)$$

$$P_{кт} = m_{c2}(x)v^2 \left( \frac{d^2 H_k}{dx^2} + \frac{d^2 H_{пол}}{dx^2} \right) - F_{cc} \left( H_{c1}, H_{c2}, \frac{dH_{c1}}{dx}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) + F_{c2} \left( H_{c2}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right). \quad (4)$$

Четвертый режим взаимодействия токоприемника с контактной подвеской возникает в случае отрыва токоприемника от контактной подвески. Обозначим перечисленные режимы колебаний, соответственно  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ .

Для того чтобы взаимодействующая система колебалась в режиме  $P_1$ , необходимо выполнение условий:

$$P_{кт} \geq 0; \quad (5)$$

$$H_k + H_{пол}^{(1)} \leq H_{c1}. \quad (6)$$

При нарушении условия (5) движение системы соответствует режиму  $P_4$ . Если не выполняется неравенство (6), то колебание системы происходит в режиме  $P_2$ .

В случае, когда движущийся токоприемник взаимодействует с контактной подвеской в режиме  $P_2$ , для расчета взаимодействия справедливы следующие формулы:

$$\begin{cases} H_k + H_{пол}^{(1)} = H_{c1}; \\ H_k + H_{пол}^{(2)} = H_{c2}. \end{cases} \quad (7)$$

Полоз токоприемника соприкасается с контактными проводами в различных точках, поэтому в общем случае величины  $H_{пол}^{(1)}$  и  $H_{пол}^{(2)}$  различны. Уравнения движения системы в режиме  $P_2$  представляются в виде:

$$\begin{cases} m_{c1}(x) + m_{c2}(x) + m_k v^2 \frac{d^2 H_k}{dx^2} = -F_{c1} \left( H_{c1}, \frac{dH_{c1}}{dx} \right) - F_{c2} \left( H_{c2}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) + P_{вл} + \\ + F_k \left( H_k, H_p, \frac{dH_k}{dx}, \frac{dH_p}{dx} \right) - m_{c1}(x) v^2 \frac{d^2 H_{пол}^{(1)}}{dx^2} - m_{c2}(x) v^2 \frac{d^2 H_{пол}^{(2)}}{dx^2}; \\ m_p v^2 \frac{d^2 H_p}{dx^2} = -F_k \left( H_k, H_p, \frac{dH_k}{dx}, \frac{dH_p}{dx} \right) + F_p \left( H_p, \frac{dH_p}{dx} \right) + P_{вр}. \end{cases} \quad (8)$$

Составляющие  $P_{кт}^{(1)}$  и  $P_{кт}^{(2)}$  силы контактного нажатия соответственно для первого и второго контактных проводов вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} P_{кт}^{(1)} = m_{c1}(x) v^2 \left( \frac{d^2 H_k}{dx^2} + \frac{d^2 H_{пол}^{(1)}}{dx^2} \right) + F_{cc} \left( H_{c1}, H_{c2}, \frac{dH_{c1}}{dx}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) + F_{c1} \left( H_{c1}, \frac{dH_{c1}}{dx} \right); \\ P_{кт}^{(2)} = m_{c2}(x) v^2 \left( \frac{d^2 H_k}{dx^2} + \frac{d^2 H_{пол}^{(2)}}{dx^2} \right) - F_{cc} \left( H_{c1}, H_{c2}, \frac{dH_{c1}}{dx}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) + F_{c2} \left( H_{c2}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right). \end{cases} \quad (9)$$

Общая величина  $P_{кт} = P_{кт}^{(1)} + P_{кт}^{(2)}$  может быть найдена из соотношения:

$$P_{кт} = -m_k v^2 \frac{d^2 H_k}{dx^2} + F_k \left( H_k, H_p, \frac{dH_k}{dx}, \frac{dH_p}{dx} \right) + P_{вл}. \quad (10)$$

Выражение (10) может использоваться для контроля правильности решения при реализации на ЭВМ. Для того чтобы взаимодействующая система колебалась в режиме  $P_2$ , необходимо выполнение двух условий:

$$P_{кт}^{(1)} \geq 0; \quad (11)$$

$$P_{кт}^{(2)} \geq 0. \quad (12)$$

При нарушении условия (11) движение системы меняется с режима  $P_2$  на режим  $P_1$ , а при нарушении условия (12) меняется с режима  $P_2$  на режим  $P_3$ . В режиме взаимодействия выполняется соотношение:

$$H_{пол}^1 + H_k = H_{c1}. \quad (13)$$

Система уравнений, описывающая движение системы в режиме  $P_3$ , представляется в виде:

$$\begin{cases} m_{c2}(x) v^2 \frac{d^2 H_{c2}}{dx^2} = F_{cc} \left( H_{c1}, H_{c2}, \frac{dH_{c1}}{dx}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) - F_{c2} \left( H_{c2}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right); \\ (m_{c1}(x) + m_k) v^2 \frac{d^2 H_k}{dx^2} = -F_k \left( H_k, H_p, \frac{dH_k}{dx}, \frac{dH_p}{dx} \right) + P_{вл} - F_{c1} \left( H_{c1}, \frac{dH_{c1}}{dx} \right) - \\ - F_{cc} \left( H_{c1}, H_{c2}, \frac{dH_{c1}}{dx}, \frac{dH_{c2}}{dx} \right) - m_{c1}(x) v^2 \frac{d^2 H_{пол}^1}{dx^2}; \\ m_p v^2 \frac{d^2 H_p}{dx^2} = -F_k \left( H_k, H_p, \frac{dH_k}{dx}, \frac{dH_p}{dx} \right) + P_{вр} + F_p \left( H_p, \frac{dH_p}{dx} \right). \end{cases} \quad (14)$$

Сила контактного нажатия взаимодействия определяется по формулам:

$$P_{\text{кт}} = -m_{\text{к}}v^2 \frac{d^2 H_{\text{к}}}{dx^2} + F_{\text{к}}(H_{\text{к}}, H_{\text{п}}, \frac{dH_{\text{к}}}{dx}, \frac{dH_{\text{п}}}{dx}) + P_{\text{вл}} \quad (15)$$

или

$$P_{\text{кт}} = m_{\text{с1}}(x)v^2 \left( \frac{dH_{\text{к}}}{dx^2} + \frac{d^2 H_{\text{пол}}^{(1)}}{dx^2} \right) + F_{\text{сс}}(H_{\text{с1}}, H_{\text{с2}}, \frac{dH_{\text{с1}}}{dx}, \frac{dH_{\text{с2}}}{dx}) + F_{\text{с1}}(H_{\text{с1}}, \frac{dH_{\text{с1}}}{dx}). \quad (16)$$

Для того чтобы система колебалась в режиме  $P_3$ , необходимо выполнение двух условий:

$$P_{\text{кт}} \geq 0; \quad (17)$$

$$H_{\text{к}} + H_{\text{пол}}^{(2)} \leq H_{\text{с2}}. \quad (18)$$

При нарушении условия (17) колебание системы переходит с режима  $P_3$  в режим  $P_4$ . если не выполняются условие (18), то меняется с режима  $P_3$  в режим  $P_2$ .

Движение системы в режиме  $P_4$  соответствует отрыву токоприемника от контактных проводов. Система дифференциальных уравнений, соответствующая режиму  $P_4$ , записывается в форме:

$$\begin{cases} m_{\text{с1}}(x)v^2 \frac{d^2 H_{\text{с1}}}{dx^2} = -F_{\text{сс}}(H_{\text{с1}}, H_{\text{с2}}, \frac{dH_{\text{с1}}}{dx}, \frac{dH_{\text{с2}}}{dx}) - F_{\text{с1}}(H_{\text{с1}}, \frac{dH_{\text{с1}}}{dx}); \\ m_{\text{с2}}(x)v^2 \frac{d^2 H_{\text{с2}}}{dx^2} = F_{\text{сс}}(H_{\text{с1}}, H_{\text{с2}}, \frac{dH_{\text{с1}}}{dx}, \frac{dH_{\text{с2}}}{dx}) + F_{\text{с2}}(H_{\text{с2}}, \frac{dH_{\text{с2}}}{dx}); \\ m_{\text{к}}v^2 \frac{d^2 H_{\text{к}}}{dx^2} = F_{\text{к}}(H_{\text{к}}, H_{\text{п}}, \frac{dH_{\text{к}}}{dx}, \frac{dH_{\text{п}}}{dx}) + P_{\text{вл}}; \\ m_{\text{п}}v^2 \frac{d^2 H_{\text{п}}}{dx^2} = -F_{\text{к}}(H_{\text{к}}, H_{\text{п}}, \frac{dH_{\text{к}}}{dx}, \frac{dH_{\text{п}}}{dx}) + F_{\text{п}}(H_{\text{п}}, \frac{dH_{\text{п}}}{dx}). \end{cases} \quad (19)$$

Условия существования режима  $P_4$  представляются в виде:

$$H_{\text{к}} + H_{\text{пол}}^{(1)} < H_{\text{с1}}; \quad (20)$$

$$H_{\text{к}} + H_{\text{пол}}^{(2)} < H_{\text{с1}}. \quad (21)$$

При нарушении условий (20) и (21) система переходит соответственно к режиму взаимодействия  $P_3$  и  $P_1$ . Токоприемник в зоне воздушной стрелки сначала двигается вдоль одного контактного провода, а затем контактирует одновременно с двумя контактными проводами и после этого – опять с одним. Учитывая сказанное и то, что характеристики двух пересекающихся контактных подвесок отличаются друг от друга, можно выделить следующие четыре варианта прохождения токоприемником воздушной стрелки:

1) в начальный период взаимодействия с воздушной стрелкой и после ее прохождения двигается по первой контактной подвеске;

2) в начальный период взаимодействия с воздушной стрелкой и после ее прохождения двигается по второй контактной подвеске;

3) в начальный период взаимодействия токоприемник движется по первой контактной подвеске, а после прохождения ее – по второй;

4) в начальный период взаимодействия токоприемник движется по второй контактной подвеске, а после прохождения стрелки – по первой.

В первом и третьем вариантах взаимодействия при безотрывном движении режимы колебаний меняются по следующим схемам:  $P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$  и  $P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1$ .

Так как колебательные процессы являются переходными, существенное значение имеют начальные условия. Неизвестно, каким способом определять эти начальные условия, поэтому необходимо стремиться к уменьшению их влияния на процессы взаимодействия токоприемника с контактной подвеской в зоне воздушных стрелок. Для этой цели требуется выбирать величину  $L_0$ , характеризующую начало счета, как можно больше. При этом в качестве начальных условий предлагается брать значения переменных, соответствующих статическому положению.

Начальные условия для первого и третьего вариантов записываются в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_k / x = -L_0 = H_{c1}^{(0)} + (P_p + P_{vp} + P_{vl})(\mathcal{K}_{cc} + \mathcal{K}_{c2}) / \Delta + \mathcal{K}_{cc} \mathcal{K}_{c2} (H_{c2}^{(0)} - H_{c1}^{(0)}) / \Delta; \\ dH_k / dx / x = -L_0 = 0; \\ H_{c2} / x = -L_0 = H_{c2}^{(0)} + (P_p + P_{vp} + P_{vl}) \mathcal{K}_{cc} / \Delta + \mathcal{K}_{c1} \mathcal{K}_{cc} (H_{c1}^{(0)} - H_{c2}^{(0)}) / \Delta; \\ dH_2 / dx / x = -L_0 = 0; \\ H_p / x = -L_0 = H_{c1}^{(0)} + (P_p + P_{vp} + P_{vl})(\mathcal{K}_{cc} + \mathcal{K}_{c2}) / \Delta + (P_p + P_{vp}) / \mathcal{K}_k + \\ + \mathcal{K}_{cc} \mathcal{K}_{c2} (H_{c2}^{(0)} - H_{c1}^{(0)}) / \Delta - h_k; \\ \Delta = \mathcal{K}_{cc} \mathcal{K}_{c1} + \mathcal{K}_{cc} \mathcal{K}_{c2} + \mathcal{K}_{c1} \mathcal{K}_{c2}. \end{array} \right. \quad (22)$$

Во втором и четвертом вариантах взаимодействия в случае безотрывного движения режимы колебаний меняются по схемам:  $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1$  и  $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ .

Начальные условия для третьего и четвертого вариантов представляются в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_k / x = -L_0 = H_{c2}^{(0)} + (P_p + P_{vp} + P_{vl})(\mathcal{K}_{cc} + \mathcal{K}_{c1}) / \Delta + \mathcal{K}_{cc} \mathcal{K}_{c1} (H_{c1}^{(0)} - H_{c2}^{(0)}) / \Delta; \\ dH_k / dx / x = -L_0 = 0; \\ H_{c1} / x = -L_0 = H_{c1}^{(0)} + (P_p + P_{vp} + P_{vl}) \mathcal{K}_{cc} / \Delta + \mathcal{K}_{c2} \mathcal{K}_{cc} (H_{c2}^{(0)} - H_{c1}^{(0)}) / \Delta; \\ dH_2 / dx / x = -L_0 = 0; \\ H_p / x = -L_0 = H_{c2}^{(0)} + (P_p + P_{vp} + P_{vl})(\mathcal{K}_{cc} + \mathcal{K}_{c1}) / \Delta + (P_p + P_{vp}) / \mathcal{K}_k - h_k + \\ + \mathcal{K}_{cc} \mathcal{K}_{c1} (H_{c1}^{(0)} - H_{c2}^{(0)}) / \Delta; \\ \Delta = \mathcal{K}_{cc} \mathcal{K}_{c1} + \mathcal{K}_{cc} \mathcal{K}_{c2} + \mathcal{K}_{c1} \mathcal{K}_{c2}. \end{array} \right. \quad (23)$$

Отметим, что в условиях отрыва токоприемника от контактной подвески схемы изменения режимов становятся более сложными и в этих схемах появляется режим  $P_4$ . При расче-

тах переход от одного режима колебаний к другому осуществляется при нарушении условий (5), (6), (11), (12), (17), (18), (20), (21).

По изложенной методике разработан алгоритм и составлена программа в Mathcad. В программе предусмотрен ввод параметров двухмассовой модели контактной подвески двумя способами. В первом из них параметры, являющиеся функциями от переменной  $X$ , вводятся в виде таблиц и при работе с ними в программе используются интерполяционные многочлены. При втором способе параметры  $m_{c1}, m_{c2}, r_{c1}, r_{c2}, r_{cc}, w_{c1}, w_{c2}, w_{cc}$  вводятся как постоянные величины, а параметры  $\mathcal{J}_{c1}(x), \mathcal{J}_{c2}(x), \mathcal{J}_{cc}(x)$  вводятся так же, как в первом способе. Системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений решаются с помощью численных методов Рунге – Кутты с автоматическим выбором шага интегрирования. Выбор варианта расчета определяется вводом специального параметра. После проведения расчетов печатаются и строятся графики значения величин  $P$  (рисунки 7 – 9).

Изложенная методика и предложенная программа позволяют на стадии проектирования прогнозировать характер взаимодействия токоприемника с контактной подвеской при различных значениях параметров системы.

Оценкой качества токосъема является контактное нажатие.

В Омском отделении Западно-Сибирской железной дороги был проведен экспериментальный объезд контактной сети вагон-лабораторией (ВИКС) с замером контактного нажатия в пролете с воздушной стрелкой ВС-1; в пролете сопряжения с воздушной стрелкой ВС-2; в пролете анкерного участка с воздушной стрелкой ВС-3. Графики контактного нажатия приведены на рисунках 4 – 6.

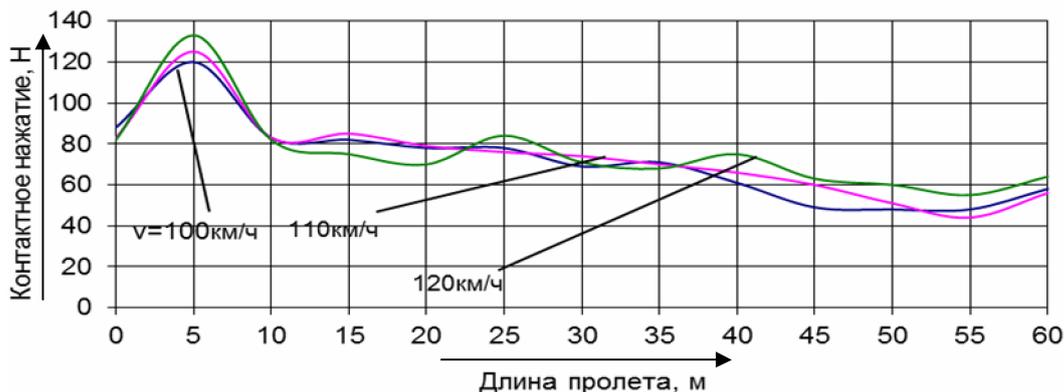


Рисунок 4 – Графики изменения контактного нажатия в пролете с ВС-1

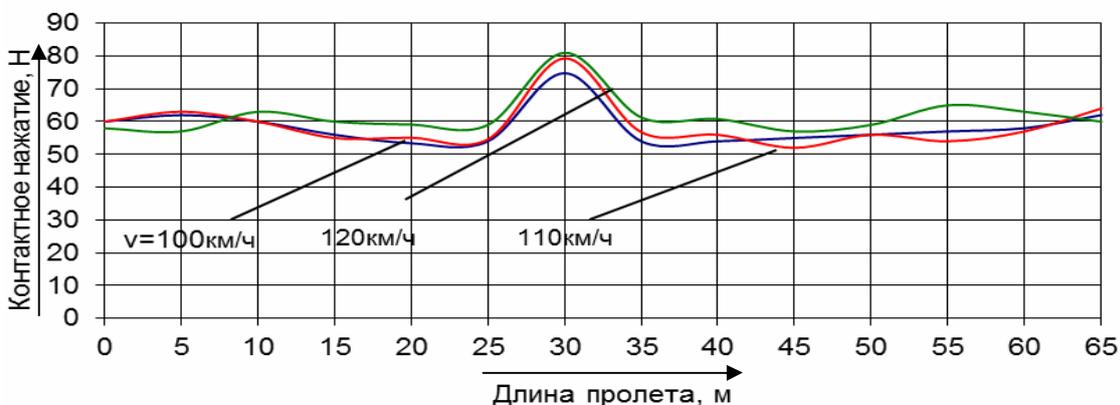


Рисунок 5 – Графики изменения контактного нажатия в пролете с ВС-2

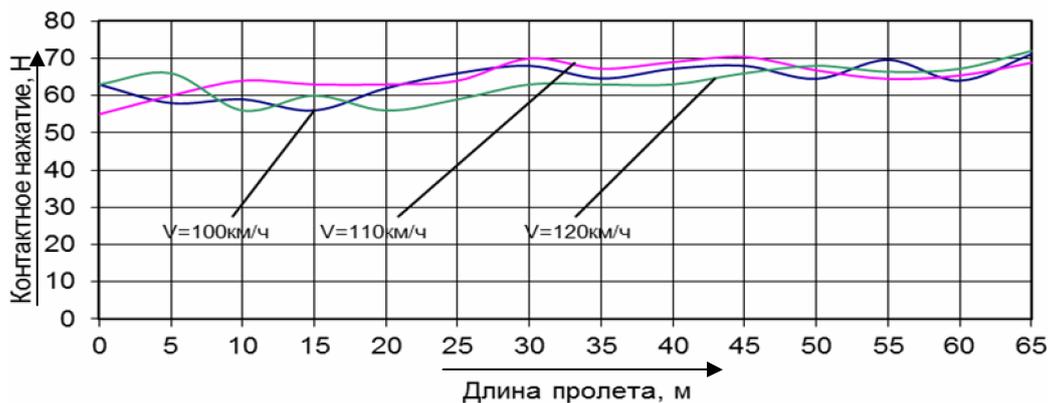


Рисунок 6 – Графики изменения контактного нажатия в пролете с ВС-3

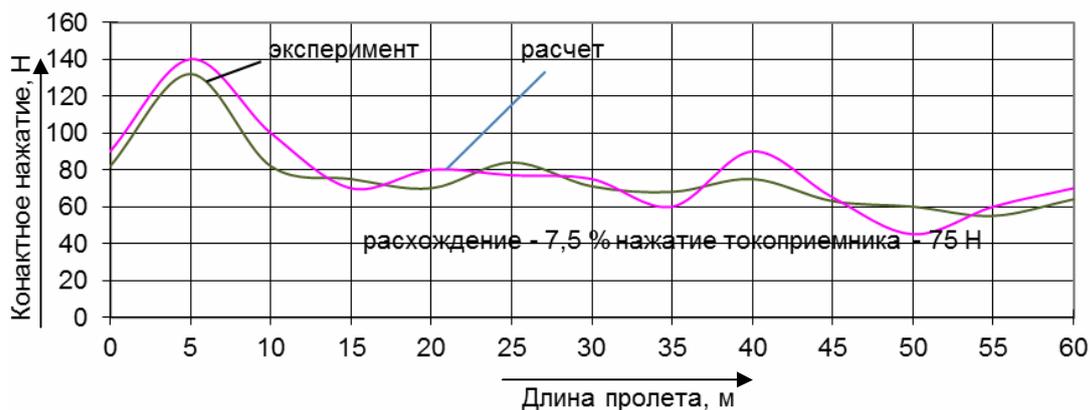


Рисунок 7 – Графики экспериментального и расчетного изменения контактного нажатия в пролете с ВС-1 при V=120 км/ч

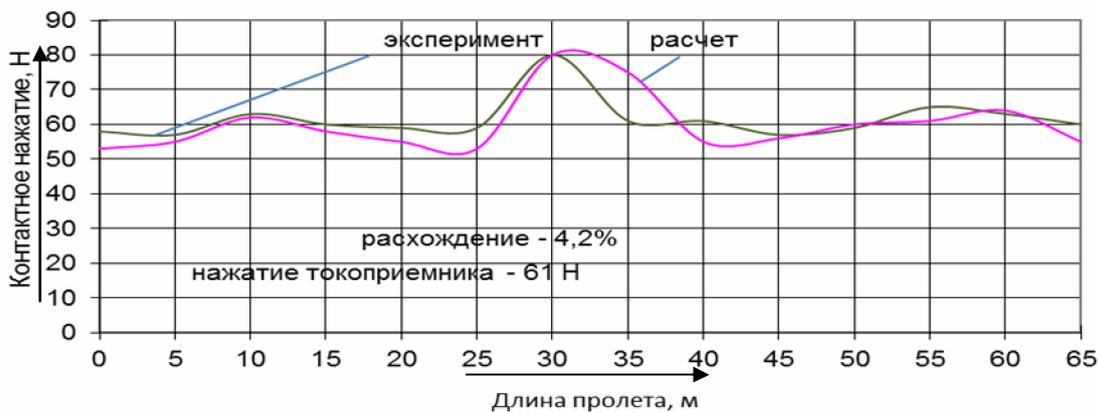


Рисунок 8 – Графики экспериментального и расчетного изменения контактного нажатия в пролете с ВС-2 при V=120 км/ч

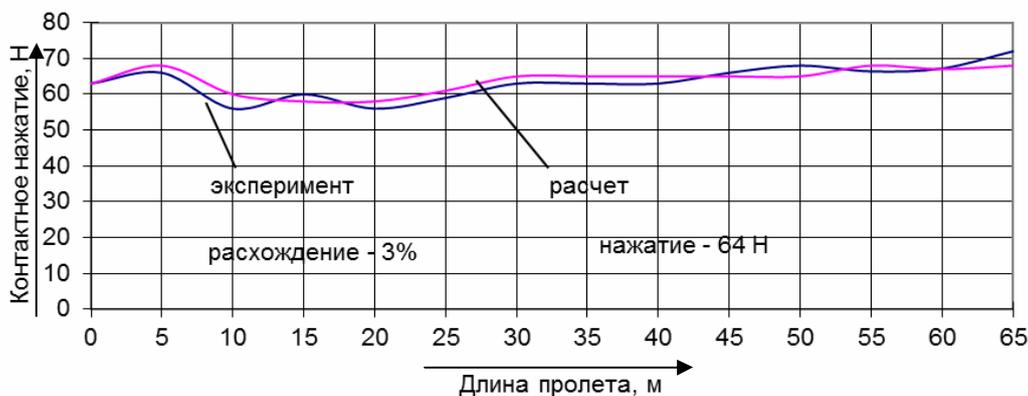


Рисунок 9 – Графики экспериментального и расчетного изменения контактного нажатия в пролете с ВС-3 при V=120 км/ч

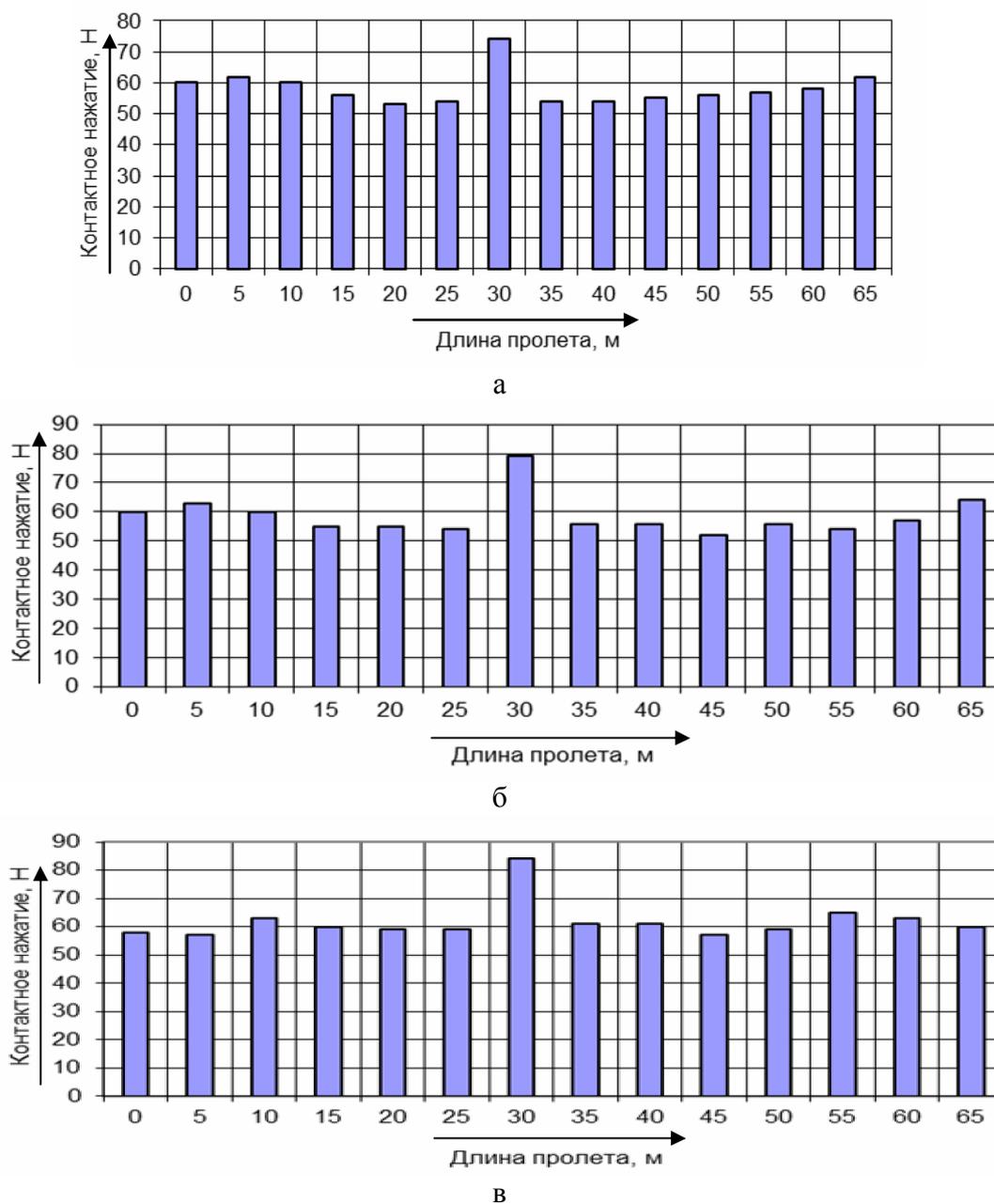


Рисунок 10 – Диаграммы нажатия токоприемника в пролете сопряжения длиной 65 м:  
а – при V=100 км/ч; б – 110; в – 120

Оценка контактного нажатия выполнялась по следующим критериям [3].

Коэффициент относительного изменения контактного нажатия  $n$ , выбираемый из двух значений:

$$n_1 = \frac{P_{\max}}{P_c} - 1 \text{ и} \quad (24)$$

$$n_2 = \frac{P_{\min}}{P_c} - 1, \quad (25)$$

где  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  – экстремальные значения контактного нажатия в одном и том же пролете. Токосъем считается удовлетворительным, если  $|n| \leq 0,3 \div 0,5$ .

Чем больше скорость движения, тем меньше следует принимать предельное значение  $n$ .

## Подвижной состав железных дорог

Максимальная переменная составляющая контактного нажатия  $Q$ , выбираемая из следующих значений:

$$Q_1 = P_{\max} - P_c \text{ и} \quad (26)$$

$$Q_2 = P_{\min} - P_c. \quad (27)$$

Исходя из сказанного выше токосъем можно считать удовлетворительным при условии:

$$|Q|_{\max} \leq (0,3 \div 0,5)P_c. \quad (28)$$

При наличии кривых изменения контактного нажатия вдоль пролета можно построить диаграммы (см. рисунок 10) и определить среднее квадратичное отклонение по формуле:

$$\sigma[P] = \sqrt{\sum_{i=1}^n [P_i - m(P)]^2 \frac{n_i}{n}}, \quad (29)$$

где  $m(P) = \sum_{i=1}^n P_i \frac{n_i}{n}$ ;

$P_i$  – средняя величина контактного нажатия в интервале  $i$ ;

$n_i$  – число случаев с нажатием  $P_i$ ;

$n$  – общее число случаев (интервалов).

Чем меньше  $\sigma[P]$ , тем лучше качество токосъема.

Кроме указанных выше при проектировании контактных подвесок и токоприемников могут быть использованы показатели оценки качества токосъема, характеризующие вертикальные перемещения точки контакта полоза токоприемника с контактным проводом.

Максимальный размах (двойная амплитуда) вертикальных перемещений точки контакта вычисляется по формуле:

$$2A = y_{k \max} - y_{k \min}, \quad (30)$$

где  $y_{k \max}$  и  $y_{k \min}$  – экстремальные значения высоты точки контакта в одном и том же пролете.

Чем меньше значения показателя  $2A$ , тем траектория движения токоприемника ближе к прямолинейной траектории токоприемника и тем лучше качество токосъема.

Сравнительный анализ критериев качества токосъема на воздушных стрелках приведен в таблице.

Анализ критериев качества токосъема на воздушных стрелках

Тип воздушной стрелки	Скорость движения ЭПС, км/ч	Коэффициент относительного изменения контактного нажатия $n$	Максимальная переменная составляющая контактного нажатия $Q$ , Н	Среднее квадратичное отклонение $\sigma(P)$ , Н	Максимальный размах вертикальных перемещений точки контакта $2A$ , мм
BC-1	V=100	0,7	54	18	72
	V=110	0,8	67	22	80
	V=120	0,7	58	18	56
BC-2	V=100	0,2	16	5,2	22
	V=110	0,3	25	6,5	20
	V=120	0,3	23	6,5	30
BC-3	V=100	0,2	17	6	21
	V=110	0,2	16	6	20
	V=120	0,1	11	5	16

1. Пат. 77583 Российская Федерация, МПК В 60 М 1/14. Воздушная стрелка контактной сети [Текст] / О. А. Сидоров, В. А. Королев, Д. Д. Жмудь (Россия). – № 2008120936/22; Заявлено 26. 05. 2008; Опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30.
2. Пат. 93349 Российская Федерация, МПК В 60 М 1/14, Воздушная стрелка контактной сети [Текст] / О. А. Сидоров, В. А. Королев, Д. Д. Жмудь (Россия). – № 2009146611/22; Заявлено 15. 12. 2009; Опубл. 27.04.2010. Бюл. №12.
3. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети [Текст] / А. В. Фрайфельд. – М.: Транспорт, 1978. – 304 с.

УДК 629.4.0267.4: 51.74

Ш. К. Исмаилов, О. В. Гателюк, А. С. Талызин

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕМОНТА КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ ВЛ10 МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В статье рассматривается возможность исследования методом имитационного моделирования процесса ремонта колесных пар электровозов ВЛ10, работающих корпоративным парком на полигоне нескольких железных дорог.*

В программах модернизации железнодорожного транспорта, объявленных руководством ОАО «РЖД» на ближайшие годы, важное место занимают программы обновления такого важнейшего элемента инфраструктуры железнодорожного транспорта, как локомотивное хозяйство. За последние года в дорожные дирекции тяги ОАО «Российские железные дороги» поступают новые и модернизированные локомотивы. Намечившееся увеличение объемов перевозок требует эффективного тягового обеспечения, устойчивой работы тягового подвижного состава (ТПС).

Поставленная задача может быть решена только при безусловном обеспечении безопасности движения поездов, значительного снижения количества отказов локомотивов, повышения надежности их работы.

Возждение поездов повышенной массы, уменьшение перегонного времени хода грузовых поездов (являющиеся способами повышения эффективности использования локомотивов) обеспечиваются реализацией локомотивом предельных и близких к ним тяговых усилий и сопровождаются увеличенным износом бандажей колесных пар локомотивов.

Распределение видов неисправностей бандажей колесных пар имеет случайный характер, зависящий от многих факторов, в том числе и от особенностей участков работы локомотивов.

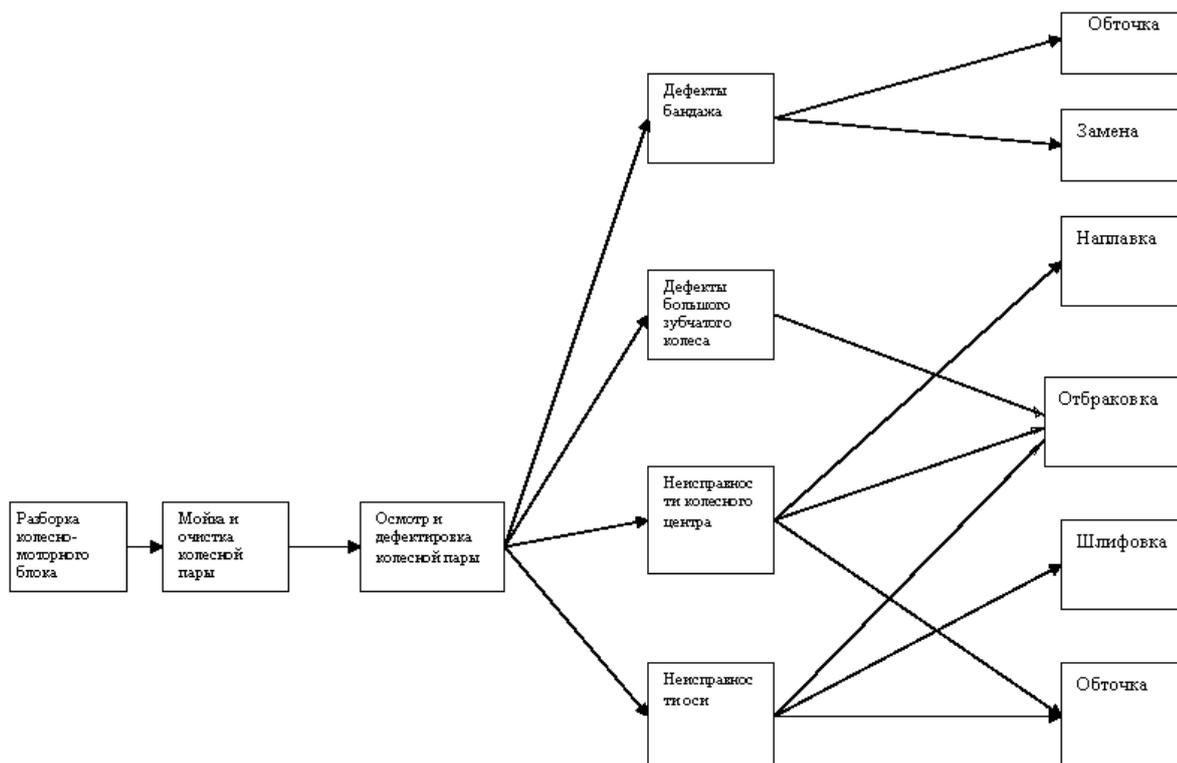
При работе локомотивного парка дирекции тяги одной железной дороги на соответствующем полигоне бандажи колесных пар этих электровозов имеют соответствующие неисправности, часто не совпадающие с неисправностями бандажей колесных пар электровозов дирекции тяги соседней железной дороги, работающих на другом полигоне.

При переходе железных дорог на обслуживание поездов корпоративным (общим) парком электровозов в связи с расширением участков работы возникает задача прогнозирования перераспределения видов неисправностей бандажей колесных пар электровозов для подготовки ремонтного производства и возможного расширения площадей и мощностей колесно-ремонтных мастерских локомотивных ремонтных депо.

Проведение анализа процесса ремонта колесных пар электровоза с точки зрения как традиционных методов сетевого планирования и управления (СПУ), так и методов теории систем массового обслуживания (СМО) и нахождения его числовых характеристик затруднено.

Это связано, во-первых, с тем, что система ремонта достаточно сложная и многоступенчатая, а во-вторых, распределение колесных пар по типам дефектов носит случайный характер, т. е. заранее без предварительного осмотра нельзя сказать, к какому типу относится поступившая на ремонт колесная пара. Более того, поступающая в ремонт колесная пара может иметь несколько различных дефектов, поэтому не представляется возможности применения таких традиционных методов анализа процесса диагностирования и ремонта колесных пар, как СПУ или СМО.

Построим граф-схему ремонта колесной пары (рисунок). Данный граф не может быть сетевым графиком.



Граф-схема ремонта колесной пары

Во-первых, поступающие в ремонт колесные пары могут иметь самые различные дефекты, во-вторых, заранее неясно, с каким дефектом поступит данная колесная пара, в-третьих, нельзя заранее сказать, будет ли свободен данный аппарат или работник, который может устранить данный дефект.

Для решения данной задачи предлагается воспользоваться методом имитационного моделирования. Дискретно-событийное моделирование предполагает абстрагироваться от непрерывной природы событий и рассматривать только основные события моделируемой системы, такие как ожидание, обработка заказа, движение с грузом, разгрузка и др. Наиболее развито дискретно-событийное моделирование, оно имеет огромную сферу приложений – от логистики и систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем. Этот вид моделирования наиболее подходит для моделирования производственных процессов.

Моделируется случайная величина – время диагностирования и ремонта колесной пары. Согласно схеме, представленной на рисунке, процесс диагностирования и ремонта колесной пары разбивается на этапы, для которых можно оценить параметры и распределение случайных величин – времени выполнения той или иной однотипной процедуры. Как показали исследования [1, 2], время выполнения однотипной процедуры можно промоделировать  $\beta$ -распределением. Параметры  $\beta$ -распределения, которое считается априорным для всех работ, можно найти из анализа значительного объема статистического материала (хронометража

времени реализации отдельных работ) либо на основании экспертных оценок. Определение параметров  $\beta$ -распределения на основании экспертных оценок рассмотрено в статье [3]. Отметим основные моменты получения оценки параметров  $\beta$ -распределения.

Эксперт на основании своего опыта или опроса определяет три временные оценки продолжительности работ:

1)  $t_{\text{опт}}$  – оптимистическая оценка, т. е. продолжительность выполнения процедуры при самых благоприятных условиях;

2)  $t_{\text{н.в}}$  – наиболее вероятная оценка, т. е. продолжительность выполнения процедуры при нормальных условиях;

3)  $t_{\text{песс}}$  – пессимистическая оценка, т. е. продолжительность выполнения процедуры при самых неблагоприятных условиях.

Используя приведенные выше оценки, можно найти среднее время выполнения работы:

$$\bar{t} = \frac{t_{\text{опт}} + 4t_{\text{н.в}} + t_{\text{песс}}}{6}, \quad (1)$$

а также на основании правила «трех сигма» – дисперсию времени выполнения работы:

$$\sigma^2 = \left( \frac{t_{\text{опт}} - t_{\text{песс}}}{6} \right)^2. \quad (2)$$

Далее методом моментов можно оценить искомые параметры  $\beta$ -распределения, но если работа производится по новой технологии, то эксперт в оценках названных выше трех времен может ошибаться. В этом случае параметры  $\beta$ -распределения будут отличаться от истинных. Определим параметры  $\beta$ -распределения времени выполнения отдельной операции с использованием методов математической статистики. Пусть имеется выборка  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$   $n$  измерений времени выполнения некоторой работы ( $n$  – объем выборки).

Выпишем соответствующие формулы для параметров  $\beta$ -распределения по данной выборке методом моментов. Известно, что плотность  $\beta$ -распределения на промежутке  $(0; 1)$  с параметрами  $a_1$  и  $a_2$  имеет вид:

$$f_{\beta(a_1, a_2)}(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (0, 1); \\ \frac{\Gamma(a_1 + a_2)}{\Gamma(a_1)\Gamma(a_2)} x^{a_1-1} (1-x)^{a_2-1}, & x \in (0, 1), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Gamma(a_i)$ ,  $i = 1; 2$  – гамма-функция. Если  $\beta$ -распределение задано на промежутке  $(a; b)$ , то плотность  $\beta$ -распределения запишется так:

$$f_{\beta(a_1, a_2)}(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (a, b); \\ \frac{\Gamma(a_1 + a_2)}{\Gamma(a_1)\Gamma(a_2)} \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^{a_1-1} \left( \frac{b-x}{b-a} \right)^{a_2-1}, & x \in (a, b). \end{cases} \quad (4)$$

Выпишем оценки параметров сначала для  $\beta$ -распределения на промежутке  $(0; 1)$ :

$$\begin{cases} a_1 = M \left( \frac{M(1-M)}{D} - 1 \right); \\ a_2 = (1-M) \left( \frac{M(1-M)}{D} - 1 \right). \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя в формулы (5) оценки математического ожидания – выборочное среднее

$$\hat{x}_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

и дисперсии – выборочную дисперсию

$$D_B = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_B)^2, \quad (7)$$

получим формулы для требуемых оценок параметров  $\beta$ -распределения по данной выборке:

$$\begin{cases} a_1^* = \hat{x}_B \left( \frac{\hat{x}_B(1-\hat{x}_B)}{D_B} - 1 \right); \\ a_2^* = (1-\hat{x}_B) \left( \frac{\hat{x}_B(1-\hat{x}_B)}{D_B} - 1 \right). \end{cases} \quad (8)$$

Если же случайная величина задана на промежутке  $(a; b)$ , то, во-первых, необходимо оценить сами параметры  $a$  и  $b$ :

$$\begin{cases} a^* = \hat{x}_{\min}(n) - \Delta; \\ b^* = \hat{x}_{\max}(n) + \Delta; \\ \Delta = (\hat{x}_{\max}(n) - \hat{x}_{\min}(n)) / (n-1), \end{cases} \quad (9)$$

где  $\hat{x}_{\min}(n)$  – наименьшее, а  $\hat{x}_{\max}(n)$  – наибольшее значение в выборке, а во-вторых, исправить формулы (9):

$$\begin{cases} a_1^* = \frac{(\hat{x}_B - a^*)}{(b^* - a^*)} \left( \frac{(\hat{x}_B - a^*)(b^* - \hat{x}_B)}{D_B} - 1 \right); \\ a_2^* = \frac{(b^* - \hat{x}_B)}{(b^* - a^*)} \left( \frac{(\hat{x}_B - a^*)(b^* - \hat{x}_B)}{D_B} - 1 \right). \end{cases} \quad (10)$$

Формулы (5) – (10) позволяют найти параметры распределения времени выполнения той или иной операции по устранению той или иной неисправности колесной пары электровоза.

В имитационном моделировании на основании опытных данных определяется частота появления колесных пар с тем или иным дефектом или группой дефектов. Затем по значениям частоты вычисляется доверительный интервал вероятности с надежностью  $\gamma$  для генеральной доли появления колесных пар этой группы:

$$p \in \left( p^* - t_\gamma \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{n}} ; p^* + t_\gamma \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{n}} \right), \quad (11)$$

где  $p^*$  – частота появления колесной пары с тем или иным дефектом в выборке;  $n$  – объем выборки, а  $t_\gamma$  определяется из уравнения  $2\Phi(t_\gamma) = \gamma$ ,  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функция Лапласа.

Зная значения наблюдаемых частот и их доверительных вероятностей, можно найти между случайными числами, получаемыми с помощью генератора случайных чисел, и значениями случайной величины частоту появления колесных пар той или иной группы. Зная, что распределение случайной величины – времени, затрачиваемого на ремонт колесных пар с различными дефектами, можно, используя генераторы случайных величин с различными распределениями, численно промоделировать процесс диагностирования и ремонта колесных пар и получить выборку откликов модели.

Для генерации значения  $z_i$  непрерывной случайной величины  $X$ , распределенной по закону с известной функцией распределения  $F(x)$ , необходимо выбрать случайное число  $r_i$ , приравнять его к известной функции распределения и решить относительно  $z_i$  полученное уравнение  $F(z_i) = r_i$ . В случае, если для непрерывной случайной величины  $X$  известна ее плотность вероятности:  $f(x)$ , для выбранного случайного числа  $r_i$  решаем уравнение:

$$\int_{-\infty}^{z_i} f(x) dx = r_i. \quad (12)$$

Поскольку  $\beta$ -распределение задано на промежутке  $(a; b)$ , для генерации значения  $z_i$  непрерывной случайной величины  $X$ , распределенной по  $\beta$ -закону с параметрами  $a_1$  и  $a_2$ , необходимо решить уравнение:

$$\int_a^{z_i} \frac{\Gamma(a_1 + a_2)}{\Gamma(a_1) \Gamma(a_2)} \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^{a_1-1} \left( \frac{b-x}{b-a} \right)^{a_2-1} dx = r_i. \quad (13)$$

На основании полученных данных выполняется построение имитационной модели. Адекватность построенной модели должна быть подтверждена как специалистами депо, так и на основании статистических критериев. Для подтверждения адекватности модели необходимо сравнить выборки откликов модели и системы ремонта в депо при близких значениях входных параметров. Можно сказать, что имитационная модель адекватна, если полученные выборки  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  и  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$  имеют близкие средние значения  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , это можно проверить с помощью двухвыборочного  $z$ -теста для средних значений:

$$T_{\text{набл}} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{(n-1)D_X + (m-1)D_Y} \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}}, \quad (14)$$

где  $n$  и  $m$  – объем соответствующих выборок, а  $D_X$  и  $D_Y$  – оценка дисперсий случайных величин  $X$  и  $Y$ . Сравнив  $T_{\text{набл}}$  с соответствующей критической точкой распределения Стьюдента  $t_{\text{кр}}(\alpha; k)$  для  $k = n + m - 2$  степеней свободы и уровнем значимости  $\alpha$ , можно сказать, что в случае выполнения неравенства  $|T_{\text{набл}}| < t_{\text{кр}}(\alpha; k)$  полученные выборки действительно имеют близкие средние значения  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , и имитационная модель адекватно отражает процесс ремонта.

Заметим, что имитационное моделирование не является методом оптимизации и не выдает никакого решения, однако оно позволяет проверить ход процесса диагностирования и ремонта колесных пар достаточно точно. В случае сложной для непосредственного математического описания ситуации имитационное моделирование позволяет провести анализ без чрезмерных упрощений, которые необходимо сделать при изучении процесса ремонта колесной пары.

Имитационное моделирование обеспечивает непротиворечивость данных и позволяет изучить систему диагностирования и ремонта колесных пар электровоза без излишнего субъективизма.

Хотя имитационное моделирование показывает лишь приблизительное поведение модели при заданных условиях в силу невозможности использовать прямые аналитические методы, имитационные методы позволят получить достоверный результат диагностирования.

## Список литературы

1. Вагнер, Г. Основы исследования операций [Текст] / Г. Вагнер. – М.: Мир, 1972. – Т. 1. – 335 с.
2. Афанасьев, М. Ю. Исследование операций в экономике [Текст] / М. Ю. Афанасьев, Б. П. Суворов. – М.: Инфра-М, 2003. – 443 с.
3. Исмаилов, Ш. К. Применение метода ПЕРТ для математического моделирования ремонта тяговых электродвигателей и колесных пар электровозов ВЛ10 [Текст] / Ш. К. Исмаилов, О. В. Гателюк и др. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 401 – 404.

УДК 629.4.015

В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, Е. В. Пономарев

## КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗУБЧАТЫХ КОЛЕСАХ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА ЭЛЕКТРОВОЗА

*В статье представлены результаты математического моделирования расчета зубчатых колес тягового редуктора, которые позволят дать оценку окружной силы и контактного напряжения в середине области контакта зубьев шестерни и зубчатого колеса тягового редуктора колесно-моторного блока с опорно-осевым подвешиванием тягового электродвигателя, возникающих от действия крутящего момента на валу якоря тягового электродвигателя, а также упругой силы и контактных напряжений, возникающих от импульсного воздействия при прохождении стыковых неровностей пути.*

Тяговый привод является одним из тяжелонагруженных узлов электровоза, на долю которого приходится существенная часть общего числа неисправностей, поэтому важнейшим требованием к существующим и вновь создаваемым конструкциям локомотивов является повышение надежности тягового привода путем снижения вибрационной и динамической нагруженности его узлов в результате применения более совершенных видов конструкции электровоза.

В настоящей работе приведены результаты математического моделирования контактных напряжений, возникающих на узких площадках контакта в зубчатой передаче тягового редуктора колесно-моторного блока с опорно-осевым подвешиванием тягового электродвигателя (ТЭД).

В области зацепления ведущей шестерни и ведомого зубчатого колеса действуют контактные силы, которые формируются в основном за счет крутящего момента и от импульсного воздействия при прохождении стыковых неровностей рельсов.

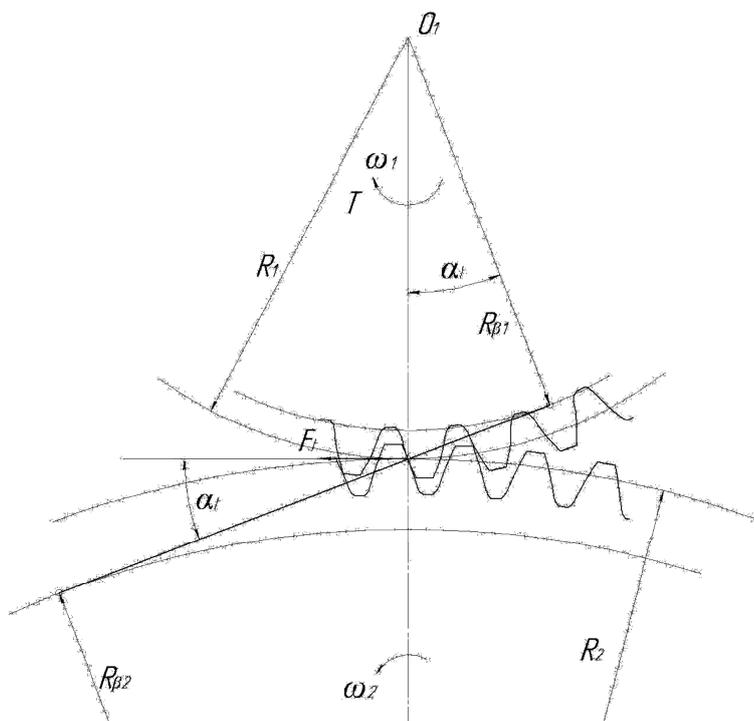


Рисунок 1 – Кинематическая схема расчета силы в зацеплении шестерни и зубчатого колеса тягового редуктора электровоза

От действия крутящего момента  $T$  в области контакта зубьев редуктора возникает окружная сила  $F_t$ . На рисунке 1 представлена кинематическая схема расчета окружной силы, где  $R_1, R_2$  – радиусы шестерни и зубчатого колеса соответственно;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – частота вращения шестерни и зубчатого колеса;  $R_{\beta 1}, R_{\beta 2}$  – основные радиусы шестерни и зубчатого колеса;  $\alpha_i$  – делительный угол профиля в торцевом сечении.

Окружная сила  $F_t$  рассчитывается по формуле:

$$F_t = \frac{T}{R_1}. \quad (1)$$

Контактные напряжения, возникающие в зубчатом зацеплении в результате действия этой силы, получим из выражения [1]:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\varepsilon \sqrt{K_A K_{H\alpha} K_{H\beta} K_{HV} \frac{F_t (u+1)}{d_1 b_1 u}}, \quad (2)$$

где  $Z_E$  – коэффициент, учитывающий механические свойства материалов сопряжения зубчатых колес;

$Z_H$  – коэффициент, учитывающий форму сопряженных поверхностей зубьев в полюсе зацепления;

$Z_\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий суммарную длину контактных линий;

$K_A$  – коэффициент внешней динамической нагрузки,  $K_A = 1,1$ ;

$K_{H\beta}$  – коэффициент распределения нагрузки по ширине венца;

$K_{HV}$  – коэффициент, учитывающий дополнительную динамическую нагрузку, возникающую вследствие неточности изготовления колес;

$K_{H\alpha}$  – коэффициент распределения нагрузки между зубьями для прямозубых колес;

$d_1$  – диаметр шестерни,  $d_1 = 2R_1$ ;

$b_1$  – ширина венца шестерни;

$u$  – передаточное отношение редуктора.

Коэффициент, учитывающий механические свойства материалов сопряжения зубчатых колес,

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi(1-\mu)^2} \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2}}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона (для большинства сталей  $\mu = 0,3$ );

$E_1$  и  $E_2$  – модули упругости материалов соответственно шестерни и зубчатого колеса.

Коэффициент, учитывающий форму сопряженных поверхностей зубьев в полюсе зацепления,

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_i} \sqrt{\frac{2 \cos \beta}{\operatorname{tg} \alpha}}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – делительный угол профиля (по ГОСТ 13755-81  $\alpha = 20^\circ$ );

$\beta$  – угол наклона зуба.

Делительный угол профиля в торцевом сечении

$$\alpha_t = \arctg \frac{tg \alpha}{\cos \beta}. \quad (5)$$

Коэффициент, учитывающий суммарную длину контактных линий,

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_\alpha}{3}}.$$

При этом коэффициент торцевого перекрытия

$$\varepsilon_\alpha = 1,88 - 3,22 \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right), \quad (6)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – соответственно количество зубьев шестерни и зубчатого колеса.

Коэффициент распределения нагрузки по ширине венца  $K_{H\beta}$  определяется по графикам, составленным на основе расчетов и практики эксплуатации [2].

Коэффициент распределения нагрузки между зубьями  $K_{H\alpha}$  определяется в зависимости от степени точности изготовления зубчатых колес по нормам плавности  $n_{ст}$ . Для косозубых передач

$$K_{H\alpha} = 1 + A(n_{ст} - 5), \quad (7)$$

где  $A = 0,15$  для шестерни и зубчатого колеса с твердостью  $H_1$  и  $H_2 > 350$  HB и  $A = 0,25$  при  $H_1$  и  $H_2 \leq 350$  HB или  $H_1 > 350$  HB и  $H_2 \leq 350$  HB. При этом  $1 \leq K_{H\alpha} \leq 1,6$ .

Коэффициент, учитывающий дополнительную динамическую нагрузку, возникающую вследствие неточности изготовления колес,

$$K_{Hv} = 1 + v_H. \quad (8)$$

Динамическая добавка

$$v_H = \frac{\omega_{Hv} b_1 d_1}{2000 T K_{H\alpha} K_{H\beta}}, \quad (9)$$

где  $\omega_{Hv}$  – удельная окружная динамическая сила,

Удельная окружная динамическая сила  $\omega_{Hv}$  определяется по формуле:

$$\omega_{Hv} = \delta_H g_0 v \sqrt{\frac{a_\omega}{u}}, \quad (10)$$

где  $\delta_H$  – коэффициент, учитывающий влияние проявления погрешностей зацепления на динамическую нагрузку;

$g_0$  – коэффициент, учитывающий влияние разности шагов зацепления зубьев шестерни и колеса;

$v$  – окружная скорость,

$a_\omega$  – межцентровое расстояние.

Окружную скорость определяем по выражению:

$$v = \frac{\omega_1 \cdot d_1}{2 \cdot 1000}, \quad (11)$$

где  $\omega_1$  – частота вращения шестерни, равная частоте вращения якоря.

После подстановки полученных значений расчетных коэффициентов в выражение (2) получим значения контактных напряжений, которые формируются за счет крутящего момента на валу якоря ТЭД.

При прохождении рельсового стыка колесная пара (КП) и все ее узлы, в том числе зубчатое колесо, приобретают вертикальную составляющую импульсной скорости [3]

$$V_B = \frac{V_{л} l_3}{r_k}, \quad (12)$$

где  $V_{л}$  – скорость локомотива;

$l_3$  – ширина зазора в рельсовом стыке;

$r_k$  – радиус колеса КП.

При этом в области контакта зубьев шестерни и зубчатого колеса возникают динамические силы импульсного характера.

Анализ контактного взаимодействия зубьев шестерни и зубчатого колеса произведем на основе расчетной схемы, представленной на рисунке 2, где  $O_1, O_2$  – центры тяжести тягового электродвигателя и колесной пары соответственно;  $m_{кп}, m_{тэд}$  – масса колесной пары и ТЭД;  $F(\delta)$  – контактная сила;  $J_{кп}, J_{тэд}$  – моменты инерции колесной пары и тягового электродвигателя;  $\delta$  – сближение зубьев шестерни и зубчатого колеса;  $x_1, x_2, \varphi_1, \varphi_2$  – смещение (обобщенные координаты) центров тяжести ТЭД и колесной пары относительно положения статического равновесия и их поворот относительно продольных осей вращения.

В рассматриваемой зубчатой передаче контактную силу в зубчатом зацеплении представим в виде зависимости от величины сближения двух цилиндров (шестерни и зубчатого колеса), выполненных из однородного материала:

$$F(\delta) = \frac{\pi E l_k}{4(1 - \mu^2)} \delta, \quad (13)$$

где  $E$  и  $\mu$  – модель упругости и коэффициент Пуассона материала зубьев;

$l_k$  – суммарная длина площадки контакта шестерни и зубчатого колеса редуктора.

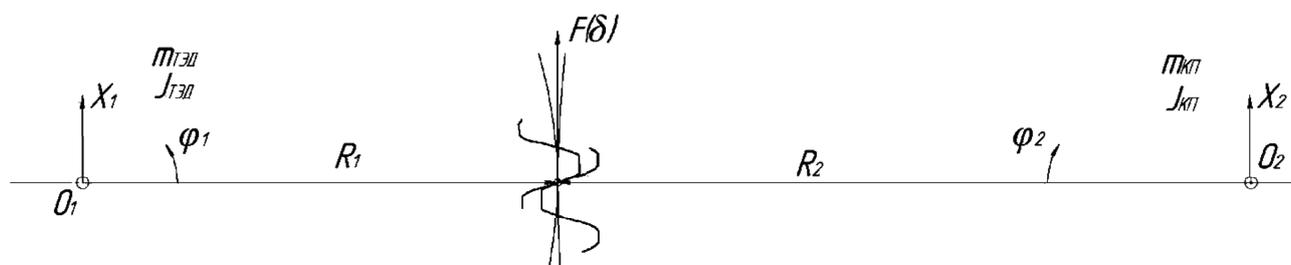


Рисунок 2 – Кинематическая схема контактного взаимодействия зубьев шестерни и зубчатого колеса тягового редуктора колесно-моторного блока электровоза

Динамику контактного взаимодействия зубьев шестерни и зубчатого колеса представим системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{тэд} \ddot{x}_1 + F(\delta) = 0; \\ J_{тэд} \ddot{\varphi}_1 + R_1 F(\delta) = 0; \\ m_{кп} \ddot{x}_2 + F(\delta) = 0; \\ J_{кп} \ddot{\varphi}_2 + R_2 F(\delta) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

со следующими начальными условиями:  $t = 0; x_1 = x_2 = \varphi_1 = \varphi_2 = 0; \dot{x}_2 = V_B; \dot{x}_1 = \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = 0$ .

Величина сближения  $\delta$  выражается через обобщенные координаты:

$$\delta = x_2 - x_1 + R_2\varphi_2 - R_1\varphi_1. \quad (15)$$

Приведем систему уравнений (5) к одному дифференциальному уравнению:

$$\ddot{\delta} + F(\delta) \left[ \frac{1}{m_{\text{кп}}} + \frac{1}{m_{\text{ТЭД}}} + \frac{R_2^2}{J_{\text{кп}}} + \frac{R_1^2}{J_{\text{ТЭД}}} \right] = 0 \quad (16)$$

с начальными условиями:  $t = 0$ ;  $\delta = 0$ ;  $\dot{\delta} = V_{\text{в}}$ .

Так как упругая сила контакта  $F(\delta)$  имеет линейную зависимость от величины сближения  $\delta$ , то уравнение (16) примет вид:

$$\ddot{\delta} + \omega_0^2 \delta = 0, \quad (17)$$

$$\text{где } \omega_0^2 = \frac{\pi E l_{\text{к}}}{4(1-\mu^2)} \left[ \frac{1}{m_{\text{кп}}} + \frac{1}{m_{\text{ТЭД}}} + \frac{R_2^2}{J_{\text{кп}}} + \frac{R_1^2}{J_{\text{ТЭД}}} \right].$$

С учетом начальных условий из уравнения (8) получим значение величины сближения:

$$\delta(t) = \frac{V_{\text{л}^3} l_3}{r_{\text{к}} \omega_0} \sin \omega_0 t. \quad (18)$$

При  $t = \frac{\pi}{2\omega_0}$  сближение  $\delta$  и упругая сила  $F(\delta)$  достигнут максимальных значений:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{V_{\text{л}^3} l_3}{r_{\text{к}} \omega_0}; \quad (19)$$

$$F_{\text{max}} = \frac{\pi E l_{\text{к}}}{4(1-\mu^2)} \frac{V_{\text{л}^3} l_3}{r_{\text{к}} \omega_0}. \quad (20)$$

Наибольшее контактное напряжение в средней части области контакта зубьев в тяговом редукторе определяются по выражению:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{2F_{\text{max}}}{l_{\text{к}} \pi b_{\text{к}}}, \quad (21)$$

здесь  $b_{\text{к}}$  – ширина площадки контакта,

$$b_{\text{к}} = 2 \sqrt{\frac{F_{\text{max}} \rho_1 \rho_2 \cdot 2(1-\mu^2)}{l_{\text{к}} \pi E (\rho_1 + \rho_2)}}, \quad (22)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – радиусы кривизны зубьев шестерни и зубчатого колеса в точке их контакта.

Предложенные математические модели позволят оценить окружную силу и контактные напряжения, возникающие в зубьях тягового редуктора от действия крутящего момента на валу якоря тягового электродвигателя, а также упругую силу и контактные напряжения в средней части области контакта зубьев, возникающие от импульсного воздействия при прохождении стыковых неровностей.

Результирующие напряжения в контакте шестерни и зубчатого колеса определяются суммированием полученных контактных напряжений по принципу наложения.

Расчетные контактные напряжения не должны превышать предельно допустимых значений.

## Список литературы

1. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст]: В 3 т. / Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 912 с.

2. Иванов, М. Н. Детали машин: Учебник [Текст] / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.
3. Кузнецов, В. Ф. Влияние конструктивных особенностей подвески тягового электродвигателя на эксплуатационную надежность моторно-осевых подшипников [Текст] / В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко и др. / Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2011. – № 1. – С. 67 – 72.

УДК 621.313

С. В. Петроченко, А. А. Федоров

## ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ УДАРНО-АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*В статье рассмотрена сущность ударно-акустической обработки (УАО) коллекторов машин постоянного тока (МПП), представлена схема установки для УАО МПП, рассчитаны режимы для УАО коллектора тягового электродвигателя ТЛ-2К1, приведены результаты исследований поверхности коллектора после УАО на наличие политуры, улучшающей коммутацию МПП, сделаны выводы о целесообразности использования метода УАО для окончательной обработки коллекторов МПП в условиях локомотиворемонтных депо.*

Существующая технология окончательной обработки рабочей поверхности коллекторов машин постоянного тока, представляющая собой операцию шлифования, имеет ряд существенных недостатков, снижающих качество ремонта коллекторов МПП:

зерна абразивного инструмента при шлифовании попадают в материал рабочей поверхности коллектора, что приводит к повышенному износу щеток;

вследствие деформации, износа колодки, разницы в диаметрах коллекторов ремонтируемых двигателей не обеспечивается плотное прилегание абразивного материала к рабочей поверхности коллектора;

длительное шлифование при помощи абразивного полотна влечет за собой возникновение завалов на краях пластин глубиной до 2 – 5 мм, приводящих к уменьшению площади контакта «коллектор – щетка» и как следствие – к ухудшению коммутации МПП;

шлифовальные и полировальные бруски имеют свойства быстро «засаливаться».

Способ ударно-акустической обработки по сравнению со шлифованием лишен всех названных недостатков и имеет следующие преимущества:

- возможность модифицирования поверхностного слоя с внедрением твердых смазок;
- формирование в процессе обработки луночно-синусоидального микрорельефа;
- создание остаточных напряжений сжатия, положительно отражающихся на конструктивной прочности рабочей поверхности коллектора [1];
- повышение теплопроводности материалов [2].

Ударно-акустический метод обработки относится к одному из способов поверхностно-пластического деформирования материалов (ППД). ППД осуществляют для формирования микрорельефа и улучшения физико-механических свойств поверхностного слоя коллектора.

Способ обработки рабочей поверхности коллектора с применением ударно-акустического метода представляет собой обработку рабочей поверхности коллектора с регулированием мгновенных (ударных) сил и изменением относительных скоростей инструмента и изделия при точечном или пунктирном сканировании поверхности [2].

Для реализации описанного способа обработки использовалась установка (рисунок 1), состоящая из корпуса 1, магнестрикционного преобразователя 2, ультразвукового инструмента 3 с криволинейной рабочей поверхностью 4, подвижной опоры 5, пружины 6, ограни-

чителя 7, опорной поверхности 8, винтовой пары 9, коллектора 10, державки 11 и суппорта станка 12.

Для определения режимов УАО рабочей поверхности коллектора тягового электродвигателя ТЛ-2К1 использовалась методика, приведенная в статье [3].

Расчетная подача инструмента определяется по формуле:

$$s_{\text{расч}} = 2\sqrt{2R_1h} [1 - K_n^s], \quad (1)$$

где  $R_1$  – радиус индентора, мм;

$h$  – глубина внедрения индентора в поверхность заготовки, мм;

$K_n^s$  – коэффициент перекрытия в направлении подачи, показывающий, какая часть площадки контакта в направлении подачи перекрывается соседней.

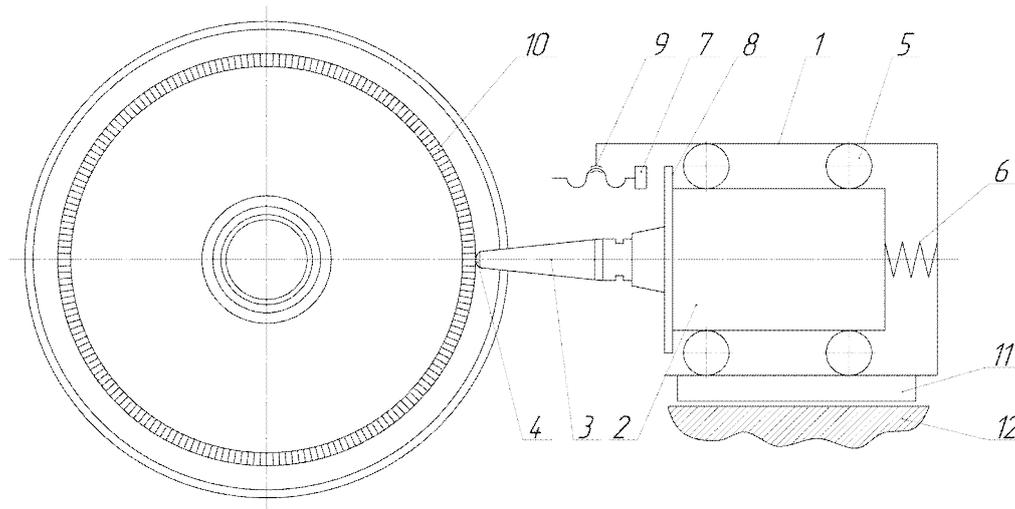


Рисунок 1 – Схема установки для ударно-акустической обработки коллекторов

Частота вращения якоря определяется по формуле:

$$n_{\text{расч}} = \frac{60f\sqrt{2R_2h}}{\pi R_2} [1 - K_n^n], \quad (2)$$

где  $f$  – частота магнестрикционного преобразователя, Гц;

$R_2$  – радиус обрабатываемой поверхности детали, мм;

$K_n^n$  – коэффициент перекрытия в окружном направлении.

Сила статического прижима при обработке коллектора определяется по формуле:

$$P_{\text{ст}} = 1,33h\sigma_T\sqrt{R_1R_2} \cdot (2 - K_n^s)\sqrt{1 - 4(1 - K_n^n)^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала, МПа.

Коэффициенты перекрытия выбирались из работы [4]:  $K_n^s = 0,84$ ;  $K_n^n = 0,97$ .

Согласно формуле (1) и при соблюдении определенных условий –  $R_1 = 3$  мм;  $h = 0,02$  мм;

$K_n^s = 0,84$  – расчетная подача ультразвукового инструмента, мм/об,

$$s_{\text{расч}} = 2\sqrt{2 \cdot 3 \cdot 0,02} \cdot [1 - 0,84] = 2 \cdot 0,346 \cdot 0,16 = 0,11.$$

При  $f = 17600$  Гц;  $R_2 = 330$  мм;  $K_n^n = 0,97$  расчетная частота вращения, об/мин,

$$n_{\text{расч}} = \frac{60 \cdot 17600 \sqrt{2 \cdot 330 \cdot 0,02}}{3,14 \cdot 330} [1 - 0,97] = 111.$$

При расчете по формуле (3) и при  $R_1 = 3$  мм;  $h = 0,02$  мм;  $K_{II}^s = 0,84$ ;  $R_2 = 330$  мм;  $\sigma_T = 70$  МПа [4] сила статического прижима, Н,

$$P_{ст} = 1,33 \cdot 0,02 \cdot 70 \sqrt{3 \cdot 330} \cdot (2 - 0,84) \sqrt{1 - 4(1 - 0,84)^2} = 64,38.$$

На основании физики процесса УАО [4] авторами статьи была выдвинута гипотеза о насыщении поверхности меди кислородом с образованием окисной пленки, состоящей из закиси меди  $Cu_2O$  и внедренного углерода, по своему составу соответствующей коллекторной пленке (политуры), улучшающей коммутацию МПТ.

Для подтверждения этой гипотезы медные ролики диаметром 40 мм подвергались УАО с внедрением чешуйчатого серебристого графита № 6. Режимы обработки рассчитывались согласно рекомендациям статьи [3]: частота вращения  $n = 31,5$  об/мин, подача ультразвукового инструмента  $s = 0,1$  мм/об, частота колебаний инструмента  $f = 17,6$  кГц, сила статического прижима  $P_{ст} = 24$  Н. Методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JCM-5700 был определен поэлементный состав данной пленки. Исследуемая поверхность и результаты исследований представлены на рисунке 2 и данными таблицы 1.

Анализируя результаты проведенных исследований, необходимо отметить высокое содержание оксида меди на поверхности образцов (85,42 %) и наличие внедренного углерода (14,58 %).

Для сравнения состава окисной пленки, полученной в результате модифицирования поверхности методом УАО, и состава коллекторной пленки (политуры) был проведен рентгенофлуоресцентный анализ политуры, наработанной при эксплуатации электродвигателя постоянного тока 2ПН100.

Таблица 1 – Результаты рентгенофлуоресцентного анализа поверхности меди после УАО

Вид анализа	Элемент	Массовая доля, %	Погрешность, %	Молярная доля, %	Оксид	Массовая доля, %
Анализ на наличие оксида	Углерод С	14,58	0,23	53,06	–	14,58
	Кислород О	17,18	–	–	–	–
	Медь Cu	68,24	0,25	46,94	$Cu_2O$	85,42
	Всего	100	–	100	–	100

Результаты исследований и исследуемая поверхность представлены в виде таблицы 2 и на рисунке 3.

Таблица 2 – Результаты рентгенофлуоресцентного анализа поверхности коллектора с наработанной политуры

Вид анализа	Элемент	Массовая доля, %	Погрешность, %	Молярная доля, %	Оксид	Массовая доля, %
Анализ на наличие оксида	Углерод С	16,63	0,39	57,09	–	16,63
	Кислород О	17,34	–	–	–	–
	Алюминий Al	1,16	0,2	0,88	$Al_2O_3$	2,19
	Медь Cu	64,74	0,42	42,00	$Cu_2O$	81,04
	Свинец Pb	0,13	0,32	0,03	PbO	0,14
	Всего	100	–	100	–	100

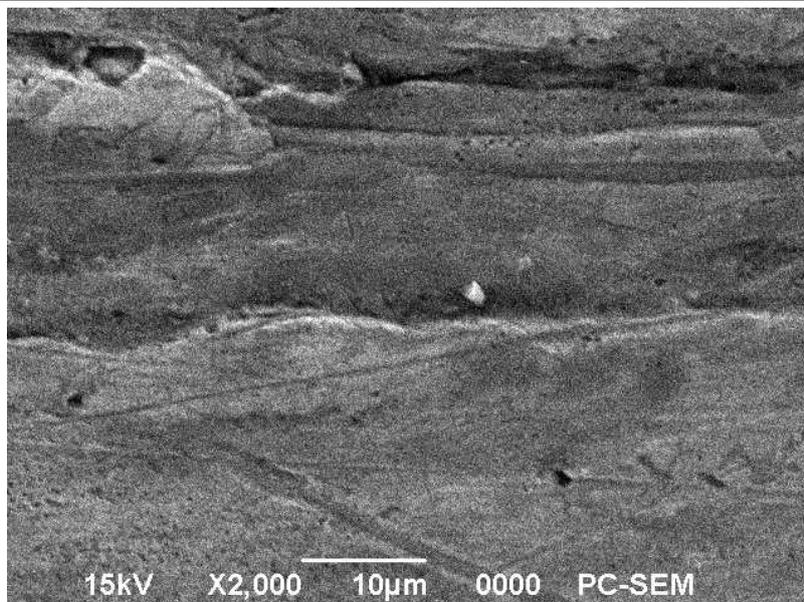


Рисунок 2 – Исследуемая поверхность после УАО (2000-кратное увеличение)

Результаты проведенных исследований по определению состава окисной пленки на поверхности меди после УАО и политуры, наработанной при эксплуатации МПТ, позволяют сделать вывод о том, что полученная окисная пленка в результате модифицирования поверхности коллектора методом УАО по своему составу соответствует коллекторной пленке (политуре).

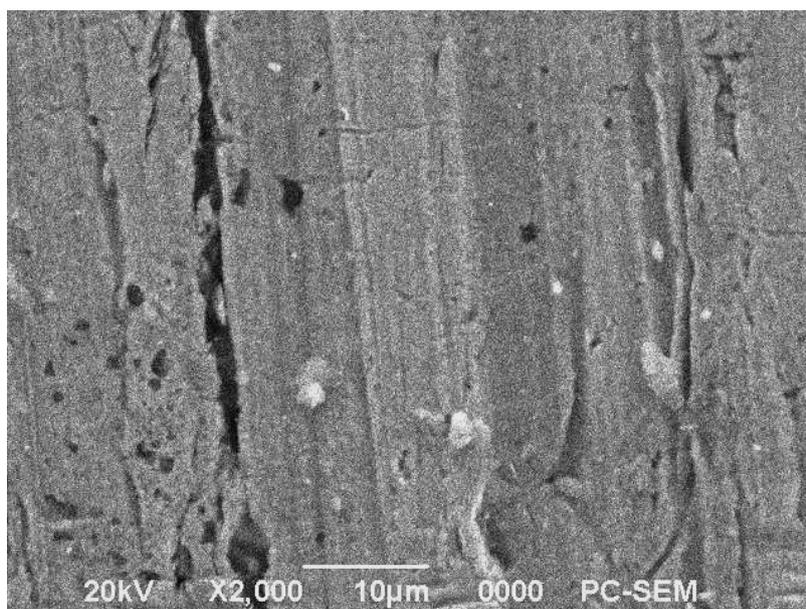


Рисунок 3 – Исследуемая поверхность коллектора с наработанной политурой (2000-кратное увеличение)

Предлагаемый метод УАО рабочей поверхности коллекторов электрических машин постоянного тока позволяет создавать упрочненный модифицированный поверхностный слой с остаточными напряжениями сжатия, положительно отражающийся на конструктивной прочности; формирует в процессе обработки луночно-синусоидальный микрорельеф, способствующий повышению площади контакта «коллектор – щетка». Проведенный рентгенофлуоресцентный анализ медных образцов на наличие окисных пленок после УАО с внедрением графита подтвердил наличие на обработанной поверхности оксида меди (86,42 %), и углерода (13,58 %). На основе результатов, полученных при сравнении состава окисной пленки по-

сле проведения УАО с составом политуры, сделан вывод о соответствии состава окисной пленки, полученной в результате УАО, составу политуры, наработанной при эксплуатации МПТ. Указанное положение позволило сделать заключение о возможности получения на рабочей поверхности коллектора политуры методом УАО. Полученные результаты исследований позволяют считать метод УАО целесообразным в качестве метода окончательной обработки коллекторов МПТ в условиях локомотиворемонтных депо.

## Список литературы

1. Телевной, А. В. Нанометаллургический процесс на основе объемной микропластичности [Текст] / А. В. Телевной, А. А. Федоров // Омский научный вестник. 2006. – № 3 (36). – С. 104 – 107.
2. Телевной, А. В. Технологические процессы повышения конструкционной прочности деталей машин [Текст]: Учебное пособие / А. В. Телевной, В. А. Телевной / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 1993. – 122 с.
3. Масыгин, В. Б. Определение режимов процесса ударно-акустической обработки [Текст] / В. Б. Масыгин, С. Б. Скобелев // Омский научный вестник. 2006. – № 10 (48). – С. 45 – 48.
4. Моргунов, А. П. Создание высокопрочных поверхностей с регулярным микрорельефом нанометаллургией [Текст] / А. П. Моргунов, А. А. Федоров // Проблемы исследования и проектирования машин: Сборник ст. III междунар. науч.-техн. конф. / – Пенза, 2007. – С. 118 – 121.

УДК 621.332

О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов

## РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТОКОСЪЕМА С ПОМОЩЬЮ АССОЦИАТИВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*В статье рассмотрены основные направления совершенствования методов оценки качества токосъема, основанные на определении интегральных показателей. Предложена методика расчета среднеквадратического отклонения контактного нажатия без измерительного токоприемника на основе ассоциативной экспертной искусственной нейронной сети, приведены алгоритмы понижения размерности входного вектора нейросетевой модели и поиска оптимальной архитектуры нейронной сети-эксперта.*

Согласно плану научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. одним из стратегических направлений является создание высокоскоростного движения с освоением отечественного производства основных элементов инфраструктуры и подвижного состава [1]. При этом на первый план выходит безопасность движения поездов, связанная в том числе и с надежностью инфраструктуры системы токосъема (ИСТ), текущее состояние которой определяется комплексом методик оценки ее функциональной готовности.

Современные методы оценки технического состояния системы токосъема, как правило, рассматривают объекты ИСТ в виде пролетов и анкерных участков контактной сети с заданным перечнем характеристик, приведенных в «Правилах устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. ЦЭ-197», основными из которых являются геометрическое положение проводов контактной подвески и контактное нажатие токоприемника.

В настоящее время оценка технического состояния ИСТ осуществляется с помощью вагонов для испытания контактной сети (ВИКСов). Аппаратура, смонтированная в таких вагонах, измеряет и регистрирует с записью на ленте и в памяти ЭВМ следующие параметры:

- зигзаги и выносы контактного провода;
- высоту положения контактного провода над уровнем головки рельса (УГР);
- «подбои» и «отрывы» токоприемника в жестких точках;
- уменьшенные расстояния в зоне прохода токоприемника до отходящих ветвей, фиксаторов и других элементов;
- контактное нажатие токоприемника.

По результатам измерений указанных параметров с помощью ВИКСа производится балльная оценка состояния контактной сети в соответствии с требованиями и нормами ЦЭ-197 для скоростей движения до 160 км/ч, которая определяет систему штрафных баллов за единичные разрегулировки контактной подвески.

С ростом скоростей движения время взаимодействия токоприемника с контактным проводом в пределах пролета контактной сети резко снижается, поэтому оценка параметров единичных пролетов не дает полной картины состояния системы «контактная подвеска – токоприемник». Следовательно, необходим новый подход к оценке состояния ИСТ, при котором параметры и характеристики контактной подвески должны задаваться в интегральной форме без учета особенностей единичных пролетов.

В качестве базисных критериев качества токосъема предлагается использовать среднеквадратическое отклонение (СКО) и вариацию контактного нажатия токоприемника, определяемые для различных скоростей движения на исследуемом участке. Измерения, производимые с помощью специализированного измерительного комплекса, могут дать необходимую информацию об указанных выше параметрах в виде массива данных для каждого исследуемого участка пути. Методика обработки данных измерительных поездок, разработанная в ОмГУПСе, предоставляет удобный доступ к массиву данных поездок, а также позволяет рассчитывать базисные критерии качества токосъема [1].

Оценить качество токосъема для обеспечения скоростного движения с помощью ВИКСа в настоящее время не представляется возможным, так как максимальная конструкционная скорость вагона составляет 160 км/ч. Следовательно, для оценки качества токосъема при скоростном движении (выше 200 км/ч) необходимо использовать подвижной состав, задействованный в регулярных коммерческих перевозках, и дополнительно оснащать его специализированным измерительным комплексом, что связано со значительными материальными и временными затратами.

В настоящее время в Омском государственном университете путей сообщения ведутся исследования по разработке методик моделирования сложных систем, позволяющих производить минимальное количество измерений при оценке готовности инфраструктуры системы токосъема для осуществления движения с высокими скоростями. Одним из направлений решения подобных задач является разработка расчетных моделей в виде вычислительной системы с известными наборами входных и выходных характеристик (рисунок 1) [2].

Основной задачей при проектировании подобных моделей является определение передаточной функции системы, которая может иметь как линейный, так и нелинейный характер, а также может зависеть от нескольких наборов входных характеристик:

$$y = f(x) + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $f(x)$  – неизвестная передаточная функция;

$x$  – вектор входных переменных;

$\varepsilon$  – вектор ошибок модели.



Рисунок 1 – Пример модели системы с набором входов и выходов

Современным и гибким инструментом анализа зависимостей в сложных системах являются искусственные нейронные сети (ИНС), позволяющие с достаточной точностью описать функционирование исследуемой системы [3]. Одним из преимуществ ИНС является их способность к обобщению при интерпретации данных, позволяющая использовать «накопленный» опыт для экстра- и интерполяции данных, а также для их классификации.

Для анализа исследуемых величин и проектирования ИНС, позволяющей производить расчет СКО контактного нажатия токоприемника, использовались экспериментальные данные поездов по участку скоростной линии Москва – Санкт-Петербург между 180 и 260 км от Санкт-Петербурга. Всего по данному участку было произведено 16 поездов с записью следующих величин: пикетаж, скорость движения ЭПС, высотное положение контактного провода относительно уровня головки рельса, зигзаг контактного провода, контактное нажатие токоприемника.

На первом этапе проектирования ИНС производится подготовка массива данных для анализа. Данные, поступающие от измерительного комплекса, заносятся в специализированную базу данных на основе СУБД MySQL. При помощи встроенных функций MySQL для обработки массивов определяется статистика случайных величин: скорости движения ЭПС, высотного положения контактного провода, контактного нажатия токоприемника. Структура базы данных приведена на рисунке 2.

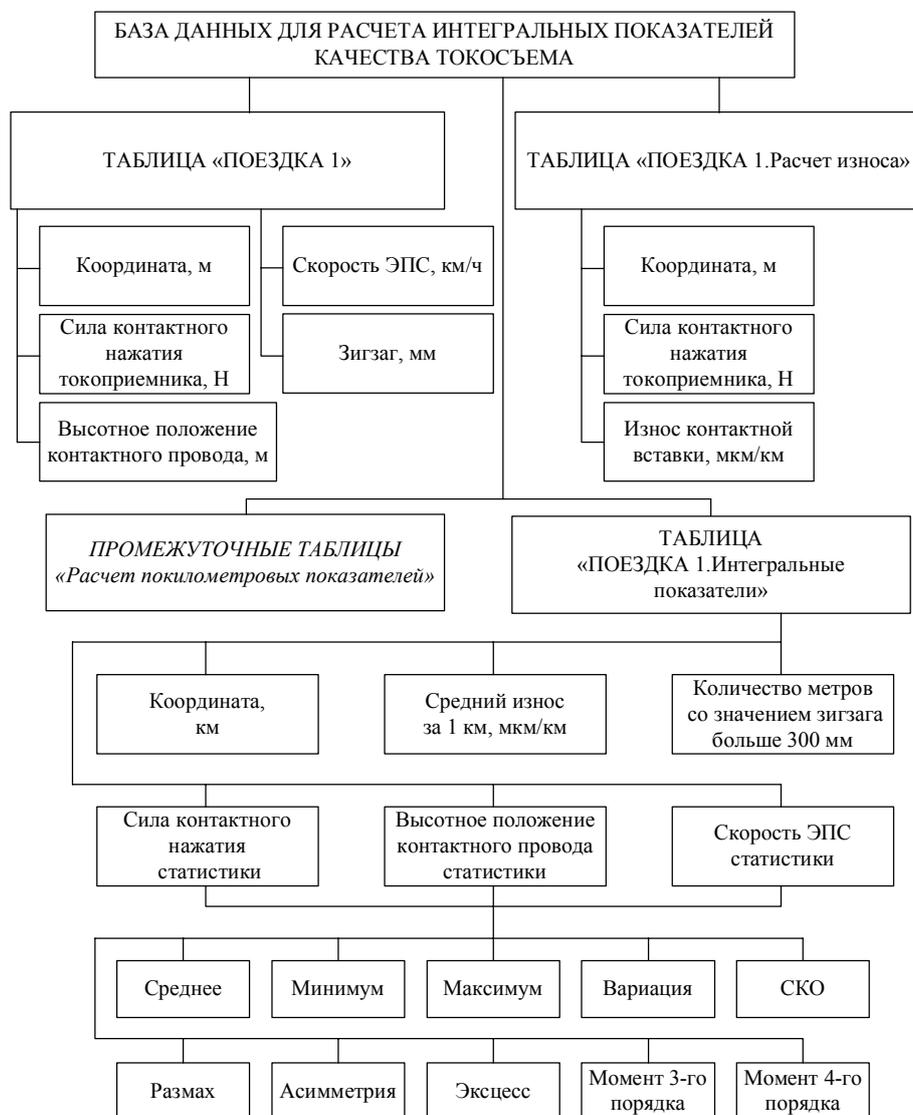


Рисунок 2 – Структура базы данных для хранения данных измерительных поездов и расчета статистик на основе СУБД MySQL

На втором этапе проектирования ИНС определяется набор влияющих факторов. Для расчета вариации и СКО контактного нажатия в качестве базового набора влияющих факторов выбраны основные статистики следующих величин: скорости движения ЭПС, высотного положения контактного провода, силы контактного нажатия токоприемника, а также количества превышений значения зигзага контактного провода 300 мм – всего 21 переменная.

Для понижения размерности необходимо преобразование входных данных. Линейное понижение размерности реализуется методом анализа главных компонент (АГК). Метод представляет собой линейное преобразование входных данных, при котором количество переменных уменьшается до заданного предела, но при этом максимально сохраняется вариация данных, однако следует отметить, что не всегда направления максимальной вариации данных несут максимальную информацию. Одним из недостатков метода АГК является способность улавливать только линейные направления максимальной вариации, поэтому более гибким методом для решения задачи понижения размерности является нелинейный вариант АГК, основанный на применении ассоциативных сетей, т. е. ИНС, реализующих воспроизведение на выходе данных, подаваемых на их вход.

Понижение размерности входного вектора производится с помощью персептрона с одним скрытым слоем, размер которого меньше размерности входного вектора. Количество нейронов входного и выходного слоев одинаково и равно 21. Функции активации нейронов скрытого и выходного слоев – биполярная сигмоидальная функция гиперболического тангенса, которая в общем виде описывается выражением:

$$\phi(x) = \tanh(\beta x), \quad (2)$$

где  $\beta$  – константа, имеющая положительные значения.

Обучение такой нейронной сети производится по методу обратного распространения ошибки с поиском направления в пространстве весов по алгоритму Левенберга – Марквардта [3]. В качестве обучающей выборки и желаемого отклика сети используется вектор входных величин из 21 переменной.

Задача обучения нейронной сети рассматривается как требование минимизации априори определенной целевой функции:

$$E_{av}(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(n), \quad (3)$$

где  $N$  – общее число образцов в обучающем множестве;

$E(n)$  – энергия ошибки единичного нейрона.

При таком подходе целесообразно применять градиентные методы обучения, которые связаны с разложением целевой функции (3) в ряд Тейлора в ближайшей окрестности точки имеющегося решения. В случае целевой функции от многих переменных такое представление связывается с окрестностью ранее определенной точки в направлении поиска в пространстве весов. Подобное разложение описывается выражением вида [3]:

$$E(w+p) = E(w) + [g(w)]^T p + \frac{1}{2} p^T H(w) p + \dots, \quad (4)$$

где  $w$  – текущее значение веса нейрона;

$p$  – направление поиска в пространстве весов;

$g(w)$  – вектор градиента,

$$g(w) = \nabla E = \left[ \frac{\partial E}{\partial w_1}, \frac{\partial E}{\partial w_2}, \dots, \frac{\partial E}{\partial w_n} \right]^T; \quad (5)$$

$H(w)$  – гессиан весов нейронной сети,

$$H(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_1} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_n \partial w_1} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_n \partial w_n} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Точное значение гессиана  $H(w)$  заменяется аппроксимированным значением  $G(w)$ , которое рассчитывается на основе содержащейся в градиенте информации с учетом некоторого регуляризационного фактора. При использовании обозначений

$$e(w) = \begin{bmatrix} e_1(w) \\ e_2(w) \\ \dots \\ e_M(w) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$J(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial(w_1)} & \frac{\partial e_1}{\partial(w_2)} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial(w_n)} \\ \frac{\partial e_2}{\partial(w_1)} & \frac{\partial e_2}{\partial(w_2)} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial(w_n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_M}{\partial(w_1)} & \frac{\partial e_M}{\partial(w_2)} & \dots & \frac{\partial e_M}{\partial(w_n)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

векторы градиента и аппроксимированная матрица гессиана, соответствующие целевой функции, определяется в виде:

$$g(w) = [J(w)]^T e(w); \quad (9)$$

$$G(w) = [J(w)]^T J(w) + R(w), \quad (10)$$

где  $R(w)$  обозначены компоненты гессиана  $H(w)$ , содержащие высшие производные относительно  $w$ .

Сущность выбранного подхода состоит в аппроксимации  $R(w)$  с помощью регуляризационного фактора  $\nu I$ , в котором переменная  $\nu$ , называемая параметром Левенберга – Марквардта, является скалярной величиной, изменяющейся в процессе оптимизации. Таким образом, аппроксимированная матрица гессиана на  $k$ -м шаге алгоритма приобретает вид:

$$G(w_k) = [J(w_k)]^T J(w_k) + \nu_k I. \quad (11)$$

В начале процесса обучения, когда фактическое значение  $w_k$  еще далеко от искомого решения (велико значение вектора погрешности  $e$ ), используется значение параметра  $\nu_k$ , намного превышающее собственное значение матрицы  $[J(w_k)]^T J(w_k)$ . В таком случае гессиан фактически подменяется регуляризационным фактором

$$G(w_k) \cong \nu_k I, \quad (12)$$

а направление минимизации выбирается по методу наискорейшего спуска:

$$p_k = \frac{g(w_k)}{\nu_k}. \quad (13)$$

По мере уменьшения погрешности и приближения к искомому решению величина параметра  $\nu_k$  понижается и первое слагаемое в формуле (9) начинает играть все более важную роль.

Скрытый слой такого персептрона реализует нелинейный метод анализа главных компонент, извлекая значимые признаки из входного вектора, передавая их на выход сети. Сигнал на выходе скрытого слоя такой сети представляет собой вектор признаков входного вектора. Блочная схема персептрона для понижения размерности приведена на рисунке 3.

Поскольку размер скрытого слоя меньше входного, то в скрытом слое может храниться меньше информации, чем во входном слое, однако она будет репрезентативной для множества данных и достаточной для реконструкции с заранее заданной точностью оригинальных входных данных. Сигналы скрытого слоя образуют нелинейные главные компоненты, из которых и образуется ядро. Количество этих компонентов равно числу нейронов  $N$  скрытого слоя. Данные, восстановленные в результате декомпрессии, будут иметь определенную погрешность. Минимизация этой погрешности и является целью обучения данной нейронной сети.

Выбор оптимального количества нейронов скрытого слоя производится методом полного перебора всех вариантов с последующей оценкой понижения размерности на экзаменуемых нейронных сетях. В качестве экзаменуемых нейронных сетей выбраны многослойные персептроны с одним скрытым слоем с количеством нейронов в скрытом слое, изменяющимся от 1 до 70, так как ранее было выявлено, что минимизация показателей качества работы нейронной сети достигается при количестве скрытых нейронов, не превышающем 60. Моделирование работы такой системы подбора оптимального количества нейронов скрытого слоя сети для понижения размерности проведено в среде Matlab с использованием набора функций Neural Network Toolbox. Структурная схема алгоритма поиска оптимального размера скрытого слоя приведена на рисунке 4.

На первом шаге алгоритма производится ввод исходных данных, экспортированных из базы данных MySQL, а также присваиваются значения переменным, являющимся входами и выходами сети понижения размерности и тестовых сетей. Начальные значения присваиваются и счетчикам, участвующим в формировании массивов выходных данных.

На следующем этапе создается цикл перебора количества нейронов скрытого слоя сети понижения размерности, которое изменяется от 20 до 2. Создается структура этой сети, которая обучается воспроизводить на выходе свои входные сигналы.

К обученной сети добавляется дополнительная синаптическая связь скрытого слоя с выходным слоем сети, выход которой и формирует вектор признаков пониженной размерности. Затем с использованием архитектуры полученной сети рассчитывается вектор откликов, который записывается в переменную, являющуюся входом для тестовых нейронных сетей.

После получения входного вектора пониженной размерности создается цикл перебора количества нейронов скрытого слоя для тестовых сетей. В теле цикла производится построение, обучение и получение откликов тестовых сетей, а также запись сетей и их откликов в переменные для последующей обработки полученных результатов.

При достижении значения переменной количества нейронов в скрытом слое тестовых сетей, равного 70, производится переход к началу цикла перебора количества скрытых ней-

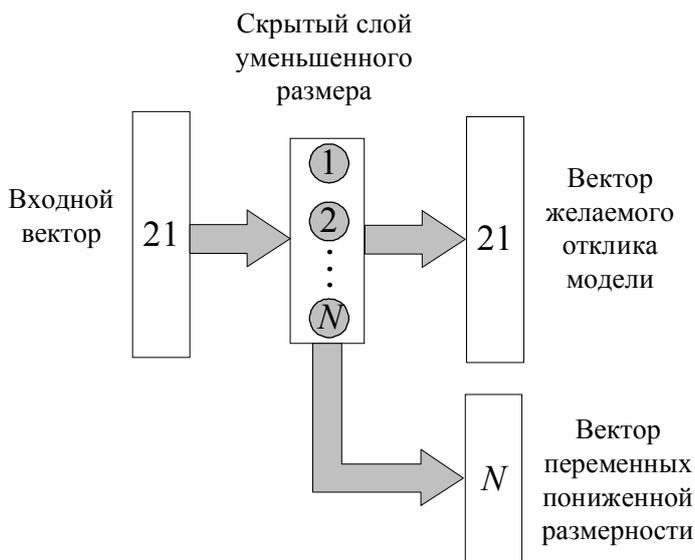


Рисунок 3 – Схема персептрона для понижения размерности входного вектора

# Подвижной состав железных дорог

ронов сети понижения размерности и итерационный процесс продолжается до тех пор, пока количество скрытых нейронов в сети понижения размерности не достигнет 2.

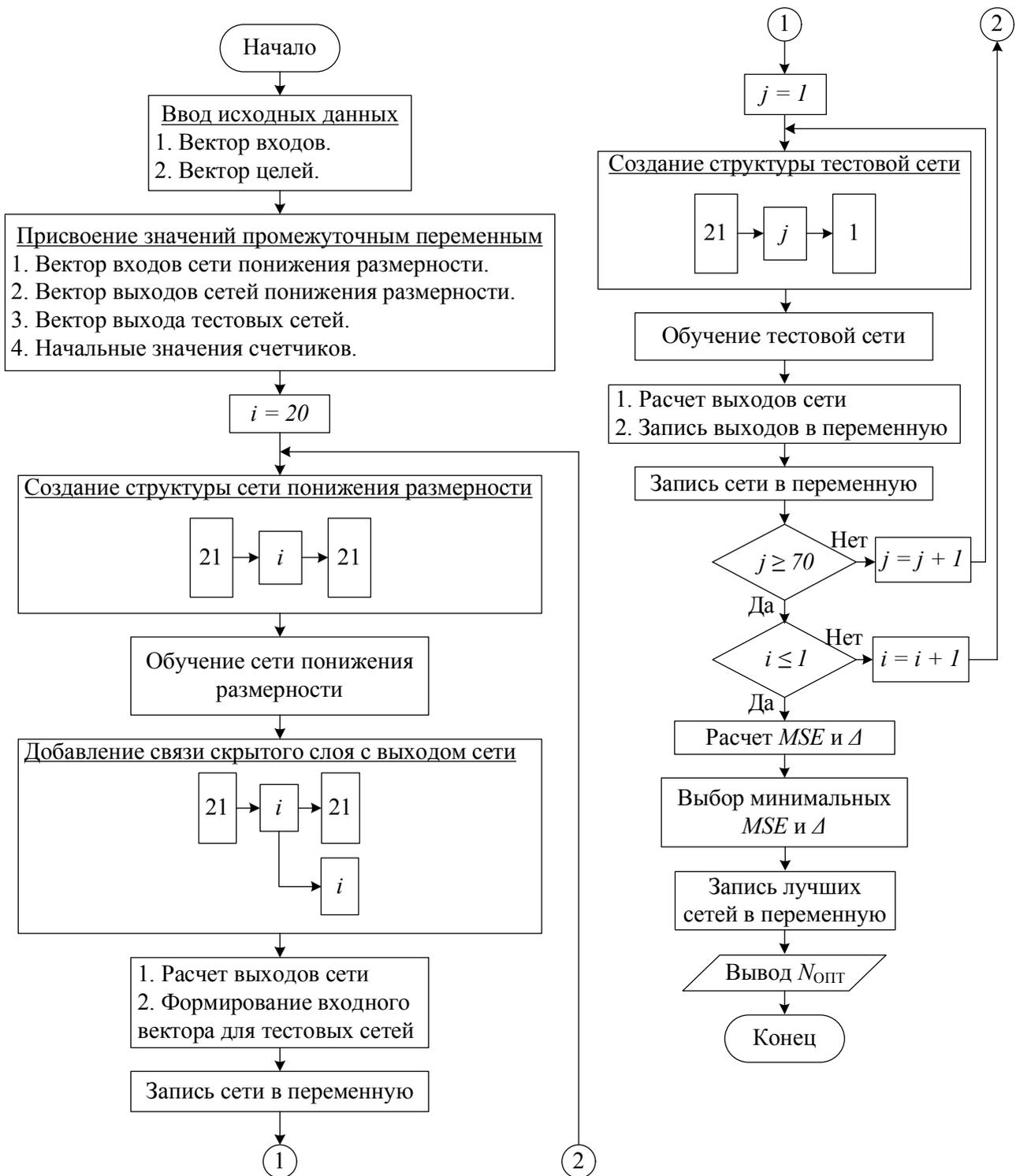


Рисунок 4 – Графическая схема алгоритма выбора оптимального размера скрытого слоя сети понижения размерности

После этого производится расчет показателей качества работы тестовых сетей: среднеквадратическая ошибка [5] –

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (14)$$

и средняя относительная ошибка:

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i}, \quad (15)$$

где  $\hat{y}_i$  – отклик нейросетевой модели;

$y_i$  – желаемый отклик модели;

$n$  – объем обучающей выборки.

Наименьшую среднеквадратическую ошибку и среднюю относительную ошибку показала тестовая сеть с 56 нейронами в скрытом слое и количеством входных переменных, равным 8. Таким образом, в качестве сети для понижения размерности принимается нейронная сеть с 8 нейронами в скрытом слое.

Задача расчета вариации контактного нажатия на каждом километре пути является сложной задачей аппроксимации неизвестной функции. Эта задача может быть разбита на ряд подзадач, выполняемых отдельными нейронными сетями-экспертами, выходные сигналы которых усредняются по ансамблю. Блочная схема ассоциативной машины, выполняющей указанное преобразование входного сигнала в выходной, приведена на рисунке 5.

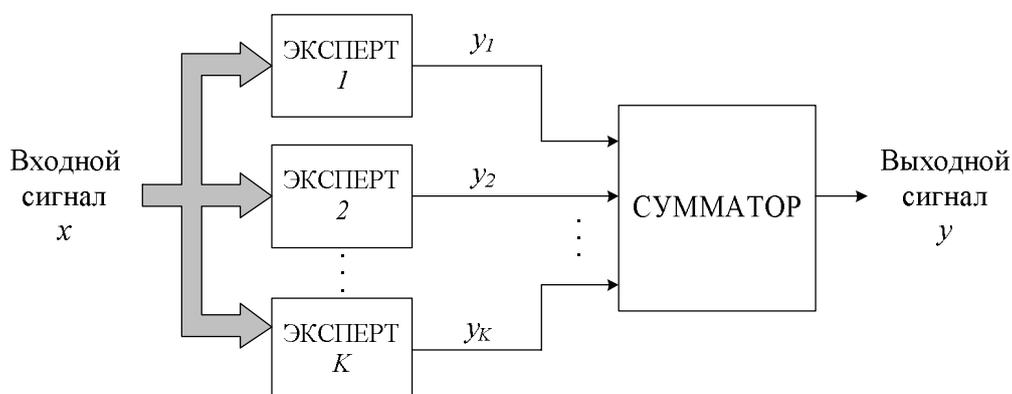


Рисунок 5 – Схема ассоциативной машины

На рисунке 5 показана схема ассоциативной машины, состоящей из множества нейронных сетей-экспертов с общим входом и сумматора. Выходные сигналы экспертов комбинируются, формируя общий выход системы. Такая структура нейронной сети имеет следующие преимущества, обусловленные сокращением количества настраиваемых параметров: сокращение времени обучения нейронной сети и снижение риска избыточного обучения сети.

При использовании ассоциативных машин обучаемые по отдельности сети сходятся к разным локальным минимумам поверхности ошибок, в результате некоторая комбинация их выходных сигналов приведет к повышению эффективности сети.

Стратегия обучения должна исходить из варьирования начальных состояний нейронов в каждой из сетей. Отдельные эксперты-машины целенаправленно могут быть обучены с избытком. В работе [3] показано, что применение в качестве экспертов перцептронов одинаковой архитектуры с различными начальными значениями весов и усреднение выходов отдельных экспертов по ансамблю приводит к снижению общей ошибки прогнозирования сети. Поэтому в качестве базовой архитектуры сети для расчета вариации контактного нажатия выбрана ассоциативная машина.

Выбор оптимальной архитектуры сети-эксперта в виде многослойного перцептрона производится методом полного перебора вариантов. В соответствии с теоремой Колмогорова [5] максимальное количество скрытых слоев многослойного перцептрона, достаточных для аппроксимации функций, равно двум, поэтому в качестве базовых архитектур сетей-экспертов принимаются многослойные перцептроны с одним и двумя скрытыми слоями. Алгоритм выбора оптимальной архитектуры приведен на рисунке 6.

# Подвижной состав железных дорог

В начале работы алгоритма присваиваются значения переменным входа и выхода моделируемых сетей и промежуточным переменным – счетчикам.

Далее создается цикл перебора переменной  $i$ , которая задает количество нейронов в скрытом слое однослойного персептрона и количество нейронов в первом скрытом слое двухслойного персептрона. На этом этапе создается структура однослойного персептрона, производится его обучение и получается отклик сети. Сеть и отклик сети записываются в переменные для возможности дальнейшего анализа.

В теле первого цикла создается еще один цикл, который изменяет количество нейронов во втором скрытом слое двухслойного персептрона  $j$ . В теле этого цикла производится создание структуры нейронной сети, обучение и сохранение ее отклика в переменные для дальнейшего анализа.

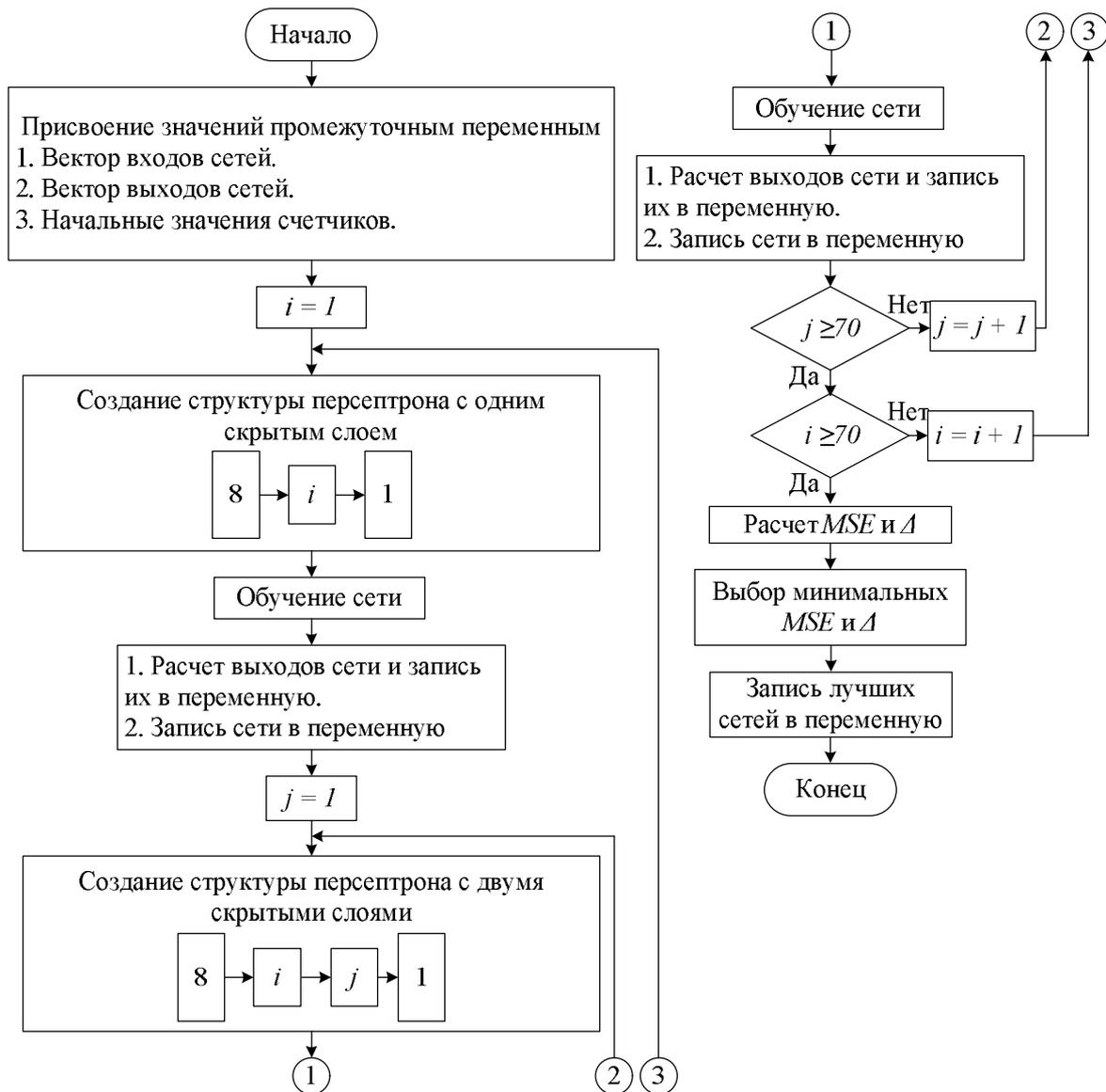


Рисунок 6 – Алгоритм поиска оптимальной архитектуры многослойного персептрона

Циклы продолжают работать до тех пор, пока переменные  $i$  и  $j$  не достигнут значения, равного 70. По окончании работы циклов производится расчет среднеквадратической ошибки (1) и средней относительной ошибки (2) для каждой из построенных сетей.

По этим показателям для последующей обработки выбирается сеть, которая имеет наименьшие ошибки. Результаты работы данного алгоритма показали, что наименьшие ошибки

достигаются при размере скрытого слоя для однослойного персептрона, равного 52 нейронам, и 26 – 24 – для двухслойного. Следовательно, в качестве базовых сетей-экспертов выбираются одно- и двухслойный персептроны размерностью, указанной выше.

Таким образом, архитектура ассоциативной экспертной нейронной сети включает в себя 10 персептронов с одним скрытым слоем и количеством скрытых нейронов, равным 52, а также 10 персептронов с двумя скрытыми слоями с количеством нейронов в скрытых слоях 26 и 24. Обучение каждой сети-эксперта происходит отдельно, начальный вес и смещение нейронов задаются случайным числом. Множество входных данных пониженной размерности разделяется на три выборки: обучающую, контрольную и тестовую в соотношении 70:15:15. Контрольная и тестовая выборки в обучении не участвуют. Обучение ведется до тех пор, пока контрольная или тестовая ошибки не превысят ошибку обучения.

Обученные сети моделируются, получается их отклик по всему множеству входных данных. Отклики отдельных сетей усредняются по ансамблю всех сетей-экспертов, в результате чего получается отклик экспертной сети, для которого по выражениям (1) и (2) рассчитываются показатели качества модели.

Результаты расчета СКО контактного нажатия с помощью экспертной сети для обучающей и контрольной выборок приведены на рисунке 7. Средняя относительная погрешность не превышает 8 %.

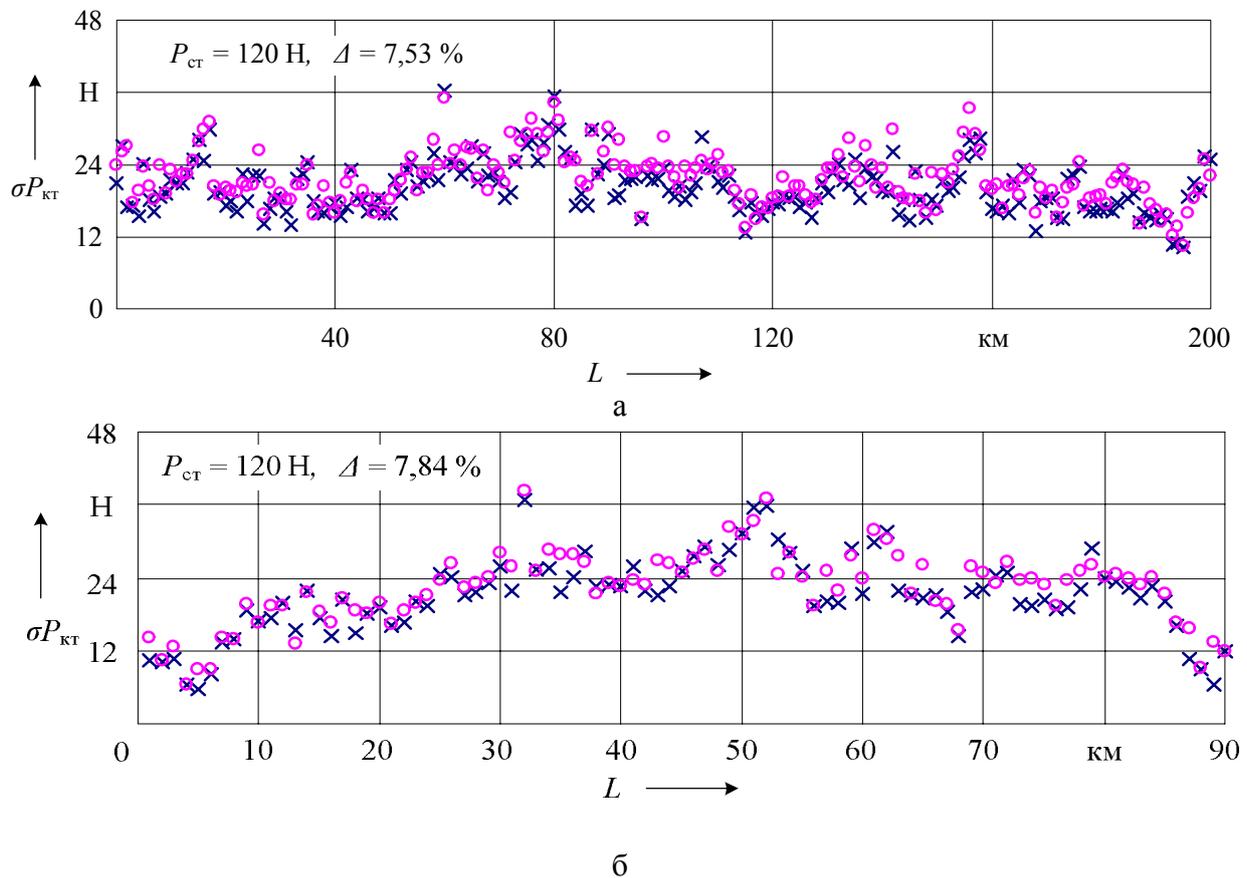


Рисунок 7 – Сравнение результатов нейросетевого моделирования вариации контактного нажатия токоприемника и экспериментальных данных: обучающая (а) и контрольная (б) выборка:  
 × – экспериментальные данные; ○ – расчет с помощью ИНС

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Предложенная методика расчета СКО контактного нажатия при наличии базы данных экспериментальных поездок позволяет производить оценку качества токосъема для скоростных линий (160 – 280 км/ч) без прямых измерений контактного нажатия, что приводит к снижению затрат на проведение измерительных поездок.

2. Средняя относительная погрешность прогнозирования СКО контактного нажатия на контрольной выборке составила 7,8 %.
3. Накопление большего набора обучающей выборки позволит увеличить способность нейронной сети к обобщению, что снизит общую ошибку определения СКО контактного нажатия токоприемника.

## Список литературы

1. Сидоров, О. А. Применение рациональных методик оценки качества токосъема магистральных электрических железных дорог [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2011. – Вып. 1(28). – С. 70 – 77.
2. Смердин, А. Н. Совершенствование методов оценки показателей скоростных контактных подвесок [Текст] / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, В. А. Жданов // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта: Сборник статей молодых ученых и аспирантов университета / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2009. – Вып. 10. – 174 с.
3. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс [Текст] / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1102 с.
4. Стратегические направления научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. («Белая книга» ОАО «РЖД») [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2007. – 46 с.
5. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: исследование зависимостей [Текст]: Справочное издание [Текст] / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.
6. Kolmogorov, A. N. On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition [Текст] / A. N. Kolmogorov // Dokl. Akad. Nauk USSR, 1957. – Vol. 114. – P. 953 – 956.

УДК 621.336.7

С. А. Ступаков, В. М. Филиппов

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА МОНОРЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

*В статье представлены результаты моделирования износа контактных пар устройств токосъема на основании экспериментальных исследований и расчета. Выполнено прогнозирование износа элементов системы токосъема монорельсового электрического транспорта.*

Одной из актуальных проблем при создании электрических транспортных систем является обеспечение надежной и экономичной передачи электроэнергии подвижному составу. Решение этой проблемы связано с разработкой новых или модернизацией существующих устройств токосъема. Передача электроэнергии электрическому подвижному составу осуществляется через скользящий контакт «контактный элемент – токопровод», вследствие чего элементы этой пары функционируют в условиях повышенного электромеханического износа. Повышение срока службы элементов контактной пары может быть обеспечено за счет выбора оптимального контактного нажатия, обеспечивающего качественный токосъем.

В 2001 г. введена в эксплуатацию трасса Московской монорельсовой транспортной системы (ММТС) между станциями метро «Тимирязевская» и «Ботанический сад». Осуществляется проектирование скоростной монорельсовой линии нового поколения сообщением «город – аэропорт». Основной проблемой данного вида транспорта при передаче электриче-

ской энергии на борт электроподвижного состава является высокий износ контактных элементов токоприемника. Для исследования и решения этой проблемы разработана методика исследования износа и прогнозирования ресурса контактных пар устройств токосъема, основанная на синтезе результатов экспериментальных исследований и математических моделей.

Методика экспериментальных исследований [1] реализуется по следующим направлениям:

- оценка работоспособности трибосистемы «контактный элемент – токопровод» при различных сочетаниях материалов и режимов испытания, соответствующих натурному узлу;

- оценка износостойкости элементов контактных пар для заданных параметров процесса эксплуатации;

- прогнозирование фрикционно-износных характеристик узла трения;

- анализ чувствительности, т. е. точное определение такого сочетания внешних факторов и их значений, при котором обеспечиваются наилучшие выходные характеристики всей трибосистемы; выявление функциональных соотношений между внешними факторами и откликом системы.

Исследования выполняют на специализированной установке возвратно-поступательного типа (рисунок 1), позволяющей моделировать процесс взаимодействия элементов контактных пар со сложной геометрической поверхностью в условиях, максимально приближенных к режиму эксплуатации устройств токосъема электрического транспорта, в том числе монорельсовых систем. Схемные решения, использованные при создании данной установки, защищены патентом [2].

Установка имеет модульную конструкцию и в зависимости от целей исследования может быть оснащена следующими модулями: для исследования силы трения в скользящем контакте, для моделирования ударных процессов при прохождении токоприемником стыковых зон токопровода, для исследования износа при высокой или низкой температуре и др.

Механическая часть установки включает в себя станину, на которой установлены направляющие, сочлененные со скользящими и закрепленной на них подвижной кареткой 4. На каретке закреплен токоприемник с контактным элементом 3, взаимодействующий с отрезком токопровода 1, закрепленным на изоляционной пластине 2. Возвратно-поступательное перемещение каретки 4 осуществляется с помощью привода вращения, связанного с кареткой тягой 7. Конструктивное исполнение тяги включает в себя блок 8 для подключения перечисленных выше модулей.

Помимо возвратно-поступательного установка позволяет проводить исследования при одностороннем движении, т. е. имитировать реальный процесс движения в одном направлении. Процесс движения в одну сторону реализуется с помощью копира 6, который устанавливается на тяге. При движении ролика 5 по поверхности копира токопровод поднимается и половину периода вращения привода элементы трибосистемы не взаимодействуют. Для имитации реального процесса взаимодействия трибосистемы «токоприемник – токопровод» в соответствии с положениями теории моделирования были выбраны параметры жесткости токопровода.

Для сокращения объема экспериментальных исследований может быть использован ком-

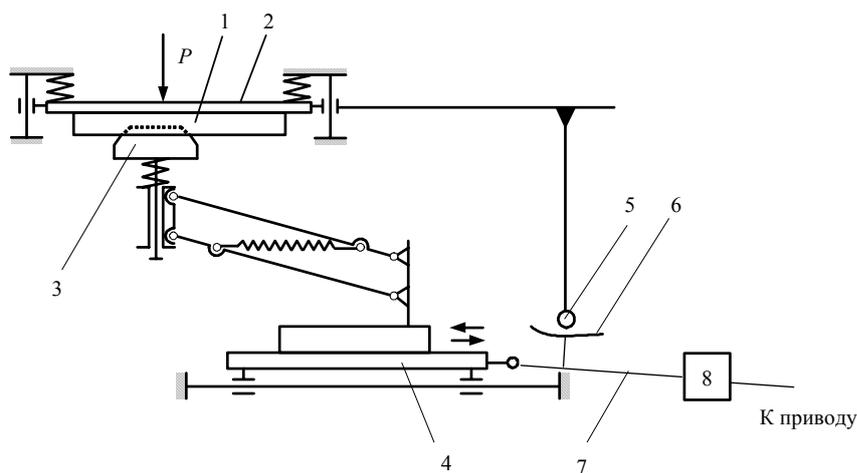


Рисунок 1 – Схема специализированной установки возвратно-поступательного типа

бинированный способ – совокупность необходимого минимума экспериментальных исследований реальных объектов (или их аналогов) и методов расчета, основанных на математическом моделировании процессов, происходящих в контактных парах устройств токосъема [3].

Моделирование процесса трения в контактных парах устройств токосъема связано с необходимостью решения многофакторной задачи, снизить количественный уровень которой позволяет теория подобия. Ввиду неоднородности составляющих процесса электромеханического износа контактных пар устройства токосъема электрического транспорта были составлены соответствующие модели для механического и электрического износа [3].

Для моделирования механического износа в соответствии с положениями теории подобия в критериях модели учтены следующие факторы: плотность, твердость, коэффициент линейного расширения, удельная теплоемкость, теплопроводность, а также определена группа факторов, составляющих модель: давление в контакте  $P$ , Н; интегральный коэффициент поверхности  $r$ , м; скорость скольжения  $v$ , м/с; время испытания  $t$ , с; содержание меди в материале контактного элемента  $M$ , %; твердость материалов контактного элемента и токопровода  $H_1$  и  $H_2$ ; теплопроводность материала контактного элемента  $\lambda_1$ , Вт/(м·К); удельная теплоемкость токопровода  $c_2$ , Дж/(кг·К). Кроме этого в критерии объединены факторы, влияющие на состояние внешней среды, – относительная влажность  $\varphi$  и количество абразива (запыленность)  $\chi$ . В качестве параметра оптимизации принят износ массы  $I_M$ .

Функциональная зависимость между параметром оптимизации и факторами модели имеет вид:

$$I_M = \psi_2(P, u, t, M, H_1 / H_2, \lambda_1, c_2, \varphi, \chi). \quad (1)$$

В соответствии с положениями теории подобия получим уравнение:

$$\frac{I_M}{P} = \psi_3 \left[ \left( \frac{Ptc_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left( \frac{v t}{r} \right)^{\beta_m} (M)^{\gamma_m} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m} \left( \frac{\varphi_0}{\varphi_1} \right)^{\lambda_m} \left( \frac{\chi_0}{\chi_1} \right)^{\omega_m} \right]. \quad (2)$$

Из формулы (2) получим уравнение, которое учитывает и другие факторы:

$$\frac{I_M}{P} = a_0 \left( \frac{Ptc_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left( \frac{v t}{r} \right)^{\beta_m} (M)^{\gamma_m} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m} \left( \frac{\varphi_0}{\varphi_1} \right)^{\lambda_m} \left( \frac{\chi_0}{\chi_1} \right)^{\omega_m}, \quad (3)$$

где  $a_0$  – постоянная, отражающая влияние на процесс неучтенных факторов;  $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m, \varepsilon_m, \lambda_m, \omega_m$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;  $I_M / P$  – симплекс (отношение износа массы контактного элемента к давлению в контакте);  $Ptc_2 / (r^2 \lambda_1)$  – комплекс (мера отношения удельной мощности трения к способности токопровода накапливать, а контактного элемента – передавать тепло);  $vt / r$  – отношение пути трения к коэффициенту поверхности контактного элемента;  $\varphi_0 / \varphi_1$  – отношение среднего значения относительной влажности окружающей среды за пять лет к значению относительной влажности на момент исследований;  $\chi_0 / \chi_1$  – отношение среднего значения запыленности окружающей среды за пять лет к значению запыленности на момент исследований.

В результате обработки экспериментальных данных, полученных на специализированной установке, получены коэффициенты уравнения.

На рисунках 2 и 3 приведены номограммы для определения коэффициентов модели  $a_0$  и  $\alpha_m$  для контактных элементов (КЭ) из различных материалов. Коэффициенты  $a_0$  и  $\alpha_m$  нелинейно зависят от контактного давления, коэффициенты  $\beta_m, \gamma_m, \varepsilon_m, \lambda_m, \omega_m$  от давления не зависят и определяются экспериментально. Пример графиков механического износа контактного элемента из меднографитового композита, полученных экспериментально и в результате расчета, приведен на рисунке 4. Приведенные зависимости использовались для решения задачи об определении оптимальных условий механического изнашивания (поиске области оптимума) для каждой контактной пары.

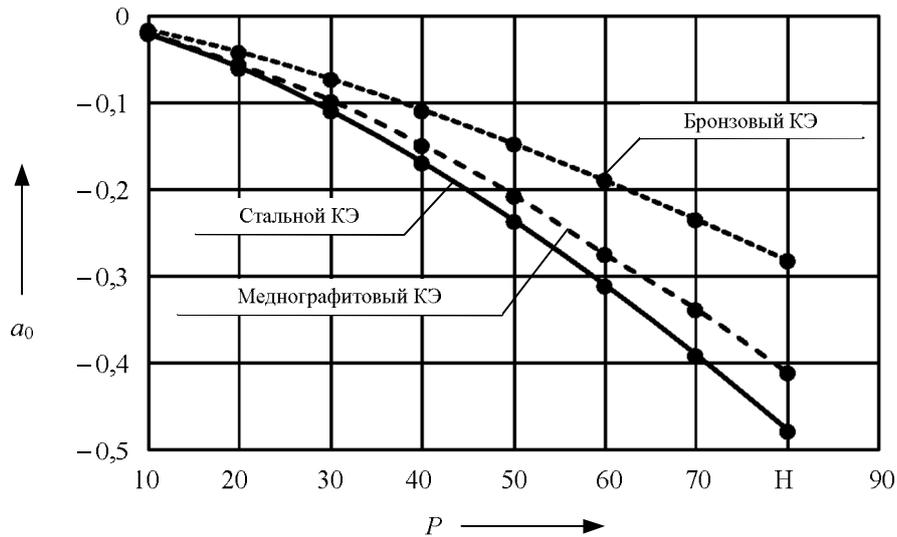


Рисунок 2 – Номограммы для определения коэффициента  $a_0$  модели

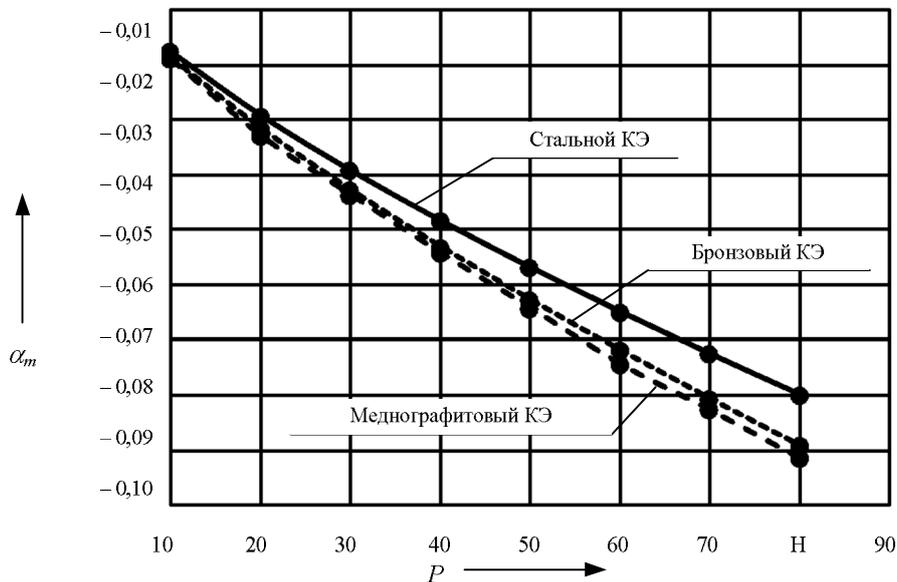


Рисунок 3 – Номограммы для определения коэффициента  $\alpha_m$  модели

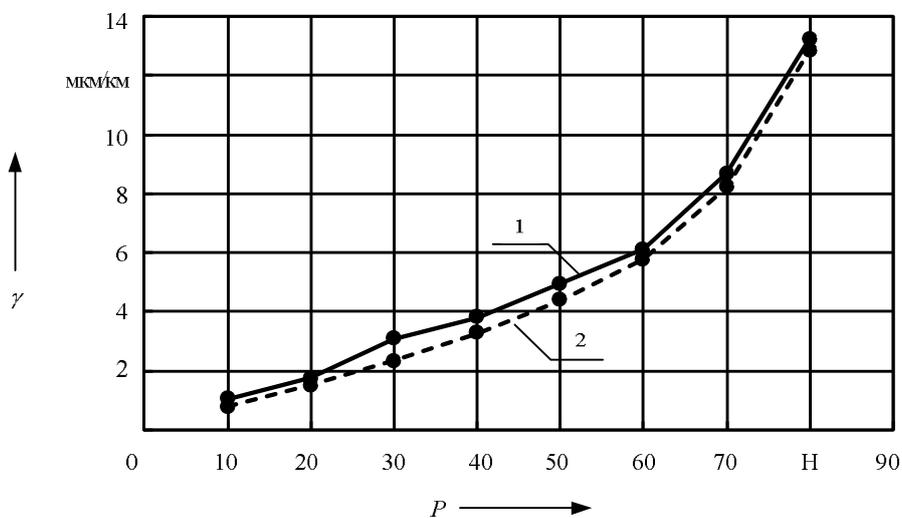


Рисунок 4 – Износ контактного элемента (меднографитовый композит,  $I = 0$ ):  
1 – результаты эксперимента; 2 – расчет

На основании анализа уравнения (3) сделан вывод, что наибольшее влияние на износ оказывают механические свойства пары трения, а наименее значительный вклад в процесс изнашивания вносит параметр, учитывающий изменение нагрузки. Скорость трения, отношение твердостей и параметры окружающей среды также вносят весомый вклад в процесс изнашивания. Особая роль отводится фактору  $M$ , который представлен в чистом виде (самостоятельной составляющей), это указывает на ведущее влияние данного фактора на процесс изнашивания.

Износ контактных пар устройств токосъема зависит не только от механической нагрузки, скорости скольжения, температуры элементов и параметров окружающей среды, но и от электрической нагрузки. Влияние электрической нагрузки может рассматриваться как дополнительный фактор, влияющий на все характеристики скользящего контакта и увеличивающий механический износ. Процесс изнашивания контактных пар при протекании через контакт тока заключается во фриттинге пленок поверхностей и электролизе.

Дальнейшее развитие модели учитывает влияние электрического тока в контакте.

Износ контактных пар устройств токосъема от воздействия электрического тока можно представить с помощью функциональной зависимости между такими факторами, как дугостойкость материала,  $s$ ; количество электричества, прошедшее через дугу,  $As$ ; давление в контакте,  $H$ ; длина пути трения,  $m$ ; комплекс, учитывающий изменение шероховатости поверхностей; комплекс, учитывающий износ при протекании тока без искрения. Общий электрический износ можно определить по формуле, приведенной в работе [4]:

$$W = Q + sP \left( W_0 + W_1 \sqrt{\frac{I}{10}} + g \sqrt{\frac{Q}{s}} \right), \quad (4)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий дугостойкость материала;  $Q$  – количество электричества, прошедшее через дугу;  $W_0$  – коэффициент износа от механической нагрузки (без тока);  $P$  – давление в контакте;  $s$  – длина пути трения;  $g$  – коэффициент, характеризующий износ материала вследствие повышения шероховатости поверхностей;  $W_1$  – коэффициент износа при токовой нагрузке без искрения.

В результате анализа данных экспериментальных исследований электрического износа уравнение (4) было преобразовано к следующему виду:

$$\frac{I_{\text{Э}}}{P} = \left[ \xi(\gamma, Q) + \zeta \cdot X_1^{k_1} \left( W_1(P, k_1, k_2) I^{k_3} + g(P, k_4, k_5) \sqrt{\frac{Q}{s}} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\xi(\gamma, Q)$  – коэффициент, характеризующий электроэрозионный износ от дугостойкости материала;  $\gamma = \gamma(k_3, t)$  – коэффициент дугостойкости, который зависит от материала, рода тока и полярности элемента контактной пары;  $Q = Q(I, n, t)$  – количество электричества, которое определяется средним значением тока дуги, количеством искрений и временем их горения;  $\zeta$  – масштабный коэффициент перехода;  $X_1 = Ptc_2 / (r^2 \lambda_1)$  – комплекс (см. уравнение (3));  $k_1 = k_1(-P^\alpha)$ , где  $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-3} k_3$ ;  $k_2 = k_2(P^{-\beta})$ , где  $\beta = 3,3 \cdot 10^{-2} k_3$ ;  $k_3 \in [1; 2]$  – коэффициент, учитывающий род тока (переменный или постоянный) и полярность контактного элемента (анодно- или катодно-поляризованный);  $k_4$  – коэффициент, учитывающий содержание меди в материале, %;  $k_5$  – коэффициент, учитывающий содержание графита в материале, %.

Такое преобразование дает возможность получить зависимость, позволяющую оценивать электрический износ элементов контактной пары.

На рисунках 5 и 6 приведены номограммы для определения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ ; остальные коэффициенты от силы контактного нажатия изменяются незначительно.

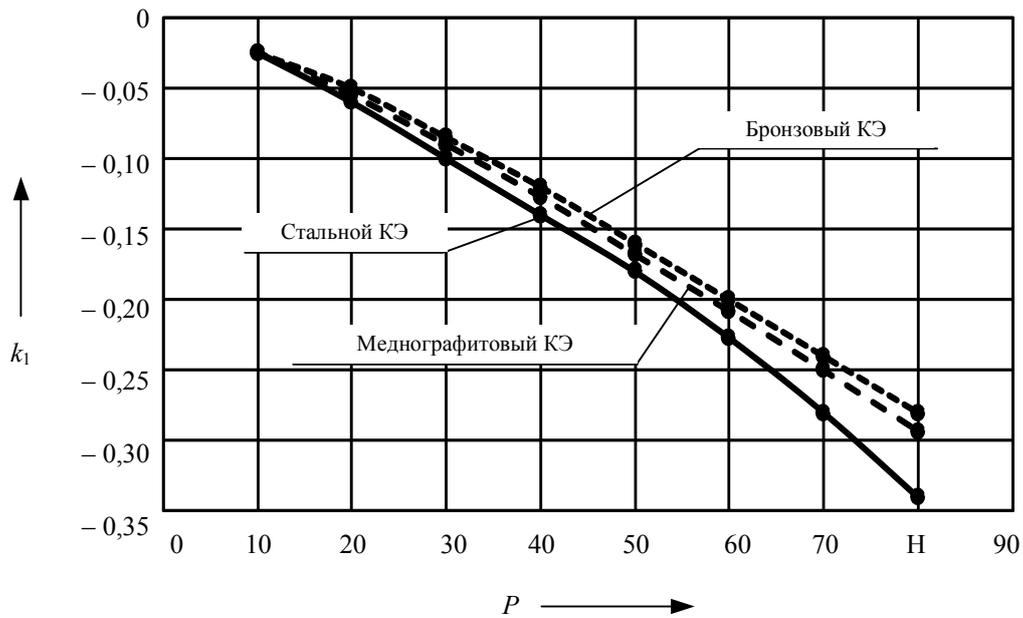


Рисунок 5 – Номограммы для определения коэффициента  $k_1$  модели

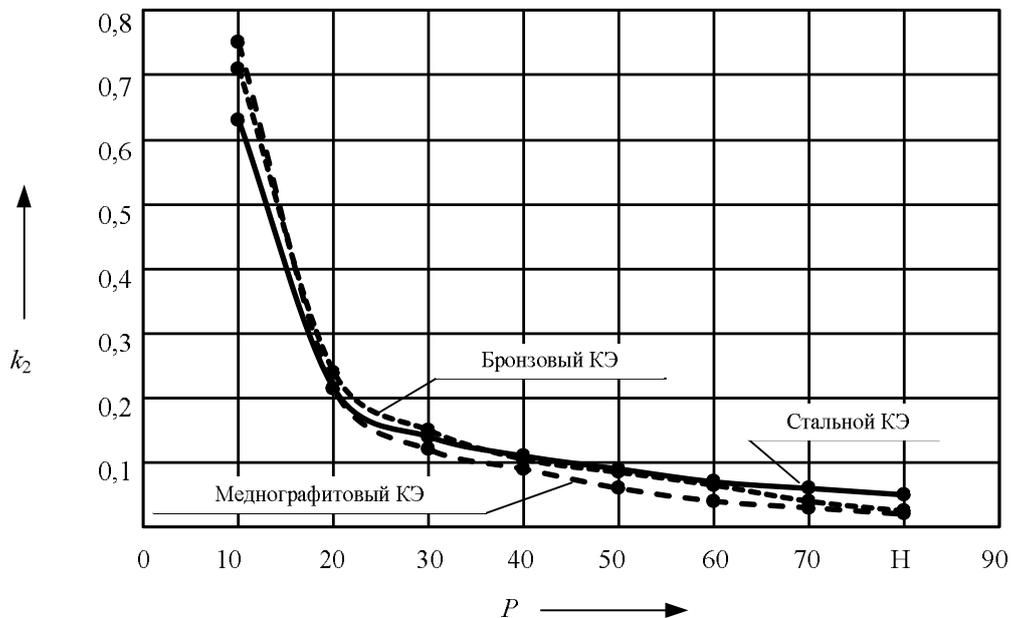


Рисунок 6 – Номограммы для определения коэффициента  $k_2$  модели

Таким образом, с учетом уравнений (3) и (5) можно получить суммарный электрохимический износ элементов контактной пары:  $I_{\Sigma} = I_{\text{Э}} + I_{\text{М}}$ .

Сравнение результатов расчета и эксперимента представлено на рисунках 7 и 8, отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 6 %. На рисунках 7 и 8 приняты следующие обозначения: 1 – экспериментальные данные (с токовой нагрузкой  $I = 100$  А); 2 – расчет ( $I = 0$ ); 3 – расчет (с токовой нагрузкой  $I = 100$  А); 4 – суммарная расчетная зависимость.

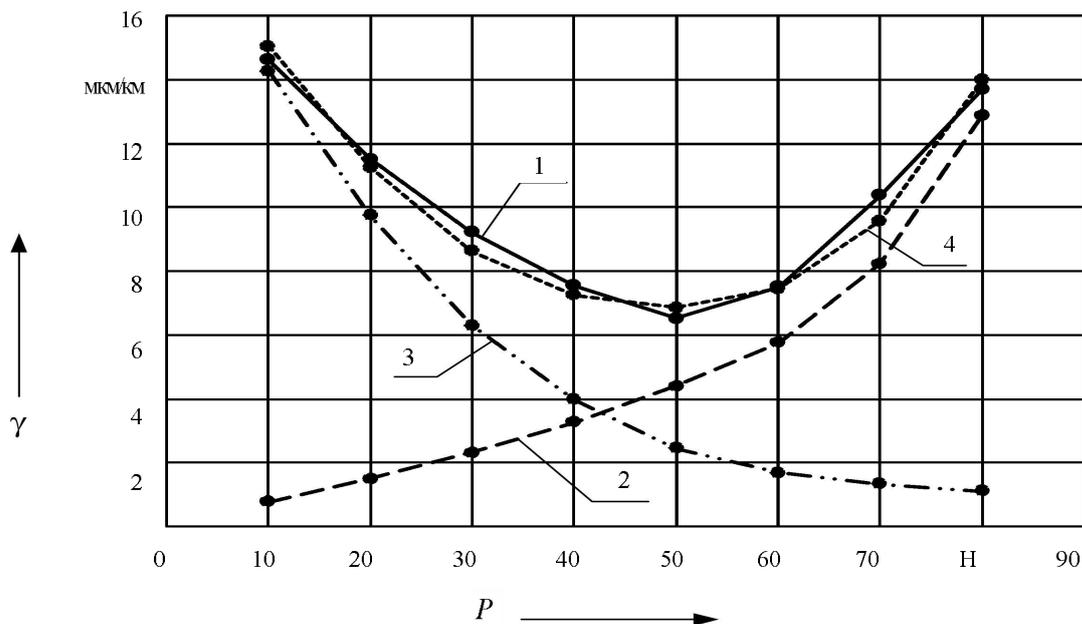


Рисунок 7 – Расчетные и экспериментальные зависимости износа контактного элемента из меднографитового композита

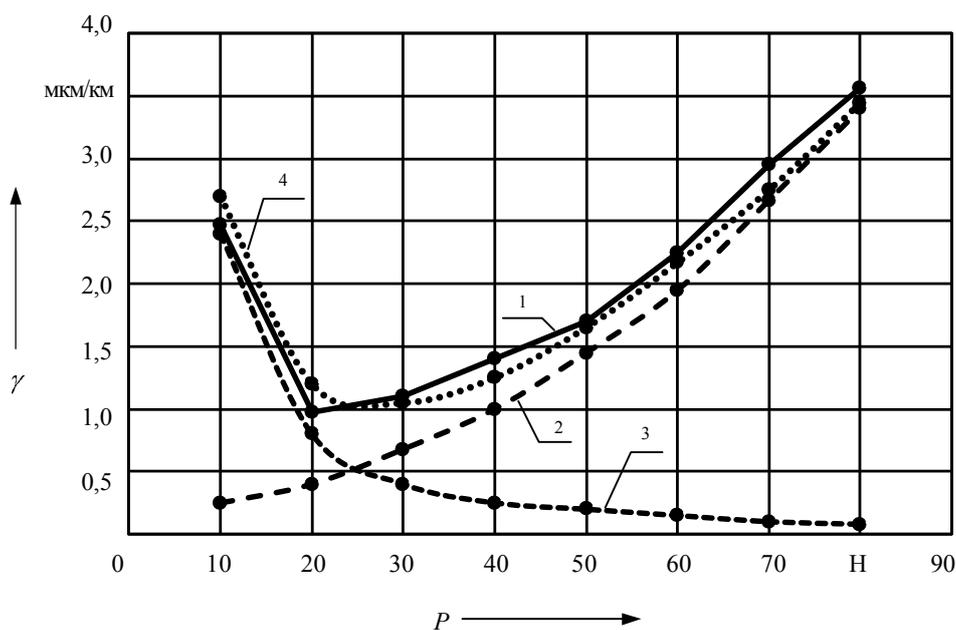


Рисунок 8 – Расчетные и экспериментальные зависимости износа бронзового токопровода

С целью оценки достоверности полученных зависимостей выполнен статистический анализ результатов эксперимента. Так как процесс изнашивания представляет собой результат воздействия на физическую систему совокупности значительного числа независимых случайных факторов, то у него наблюдаются свойства нормального закона распределения. Для проверки нормального распределения были рассчитаны критерии Пирсона. Так, полученное значение  $\chi^2 = 6,8432$  меньше табличного 7,8147, значит, закон распределения выбран верно. Приведем значения дисперсии параметра оптимизации  $S^2(y)$  и дисперсии коэффици-

# Подвижной состав железных дорог

ента регрессии  $S^2(b_i)$  для контактной пары «меднографитовый композит – бронза»:  $S^2(y) = 0,0439$ ;  $S^2(b_i) = 0,0237$ . Гипотеза адекватности проверялась по критериям Фишера и Стьюдента. Значения критериев сведены в таблицу. Выполняются условия  $\Phi_p < \Phi_T$  и  $t_p < t_t$ , следовательно, модель адекватна.

Критерии Стьюдента и Фишера при обработке результатов эксперимента

Давление в контакте	Меднографитовый композит		Бронза	
	расчетные значения критерия			
	Фишера	Стьюдента	Фишера	Стьюдента
10	1,89	1,96	2,13	1,52
20	1,71	1,65	1,02	1,70
30	1,65	1,88	2,03	0,89
40	1,99	1,72	1,97	0,83
50	2,03	1,76	0,65	1,74
60	1,95	1,86	1,61	1,91
70	1,44	1,31	1,74	1,85
80	2,02	1,89	1,69	1,38
Табличное значение критерия	2,14	1,97	2,14	1,97

Распределение вероятностей экспериментальных значений в доверительном интервале приведено на рисунке 9.

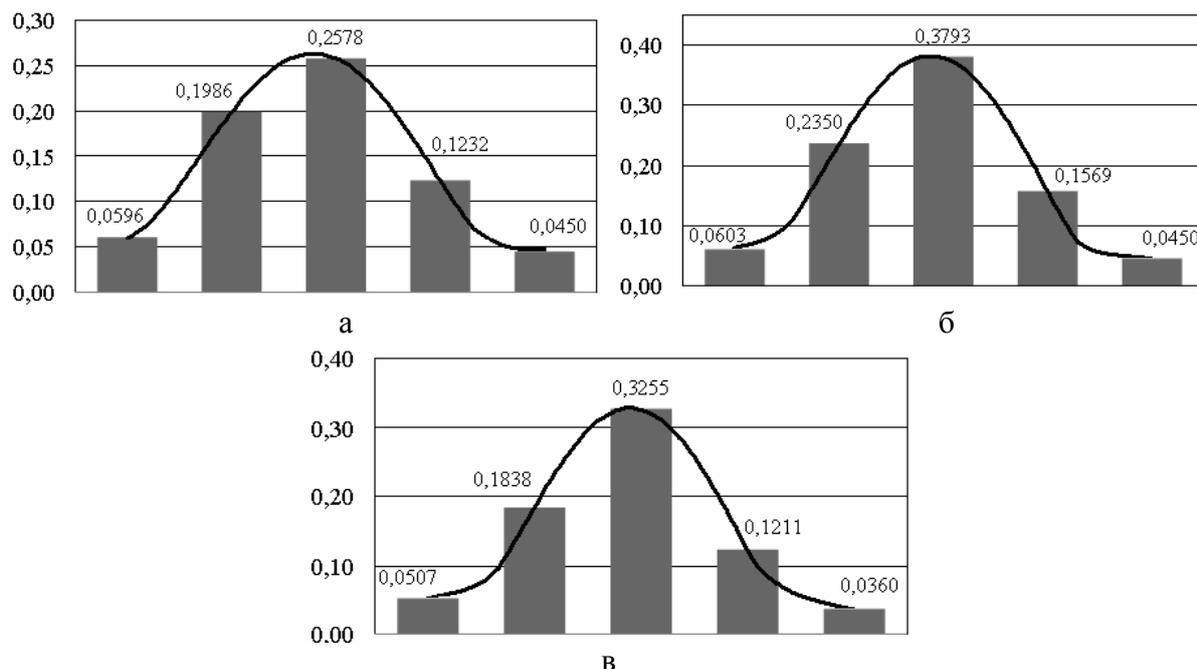


Рисунок 9 – Распределение вероятностей экспериментальных значений в доверительном интервале (меднографитовый композит): а – давление в контакте 10 Н; б – 50 Н; в – 80 Н

Массив информации, полученной в результате экспериментальных исследований и расчета износа контактных пар, используется для прогнозирования срока их службы. Алгоритм прогнозирования представлен на рисунке 10. Исходными данными для прогнозирования являются также графики контактного нажатия токоприемника, токовой нагрузки, скорости движения подвижного состава на конкретном участке и параметры условий эксплуатации. Затем выполняется обработка графика контактного нажатия  $P_{кт}$  на заданном участке: определение среднего значения нажатия, значений предельных отклонений (и количества откло-

нений) и т. д. Окончательный расчет износа контактных элементов и прогнозирование их ресурса осуществляются путем компьютерной обработки результатов анализа графика  $P_{кт}$  и  $U$ -образной зависимости износа.

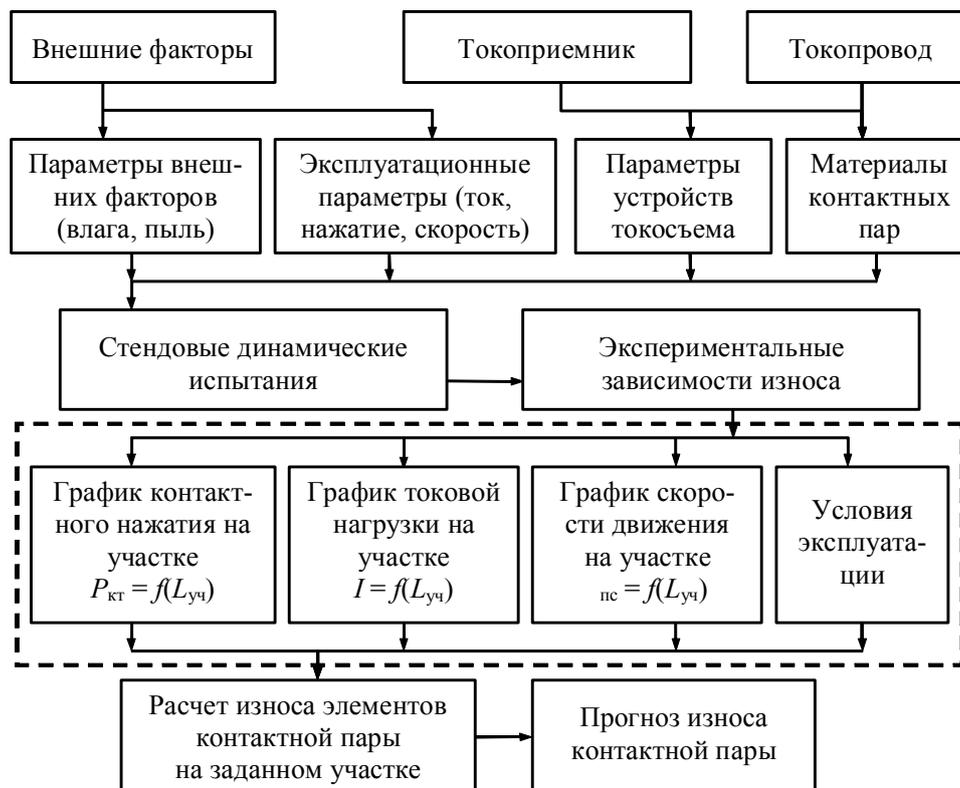


Рисунок 10 – Алгоритм прогнозирования износа контактных пар

Результаты прогнозирования для меднографитового контактного элемента приведены на рисунке 11.

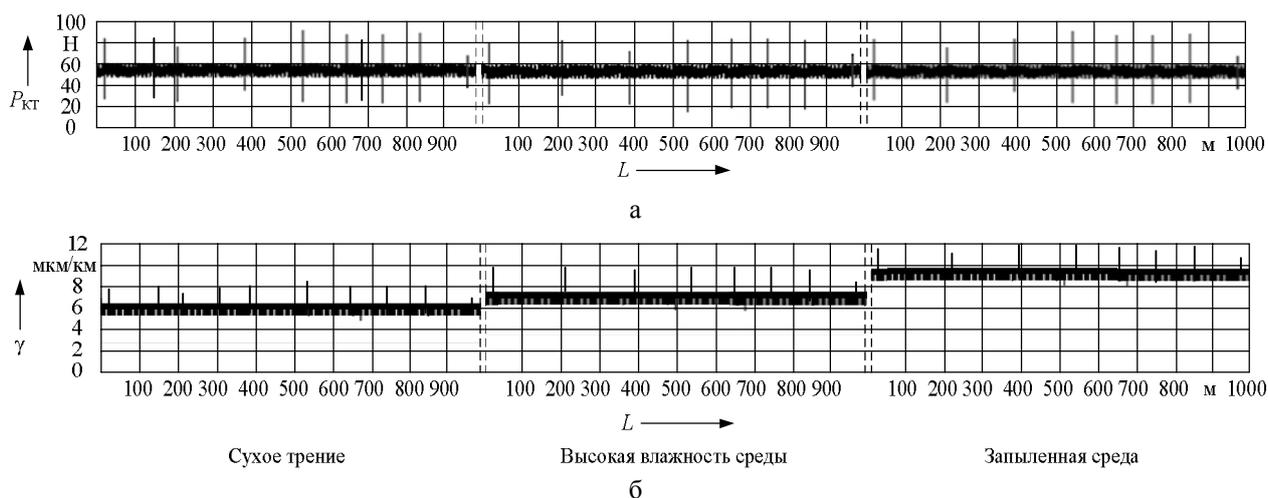


Рисунок 11 – Графики прогнозирования износа меднографитового КЭ:  
а – контактное нажатия на участке; б – удельный износ контактного элемента

На основании анализа экспериментальных исследований создана математическая модель, позволяющая выполнять расчет электромеханического износа контактных пар устройств токосъема монорельсового транспорта.

Анализ экспериментальных исследований и результатов расчета показывает, что отклонение значений составляет не более 6 % для различных материалов.

## Список литературы

1. Михеев, В. П. Исследование и прогнозирование износа контактных пар устройств токосъема [Текст] / В. П. Михеев, О. А. Сидоров, И. Л. Саля // Известия вузов. Электромеханика. 2003. – № 5. – С. 74 – 79.
2. Пат. на полезную модель № 58463. МПК В60L 3/12. Устройство для исследования скользящего контакта между токоприемником и токопроводом [Текст] / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков, А. С. Голубков и др. Заявлено 29.06.2006; 2006. Опубл. 27.11.06. Бюл. № 33.
3. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах [Текст] / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
4. Мышкин, Н. К. Электрические контакты [Текст] / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 558 с.

УДК 621.313.2

В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИБОРА ПКК-5М

*В статье представлены результаты математической обработки экспериментальных данных коммутационных испытаний машины постоянного тока серии 2П, на основании которых установлен набор диагностических параметров, позволяющих проводить диагностирование с большей достоверностью. С помощью усовершенствованного прибора контроля качества коммутации ПКК-5М проведены экспериментальные исследования в соответствии с составленным планом полного факторного эксперимента. В итоге для электрической машины серии 2П получены уравнения регрессии среднего уровня искрения и среднего квадратичного отклонения интенсивности искрения по коллектору и во времени для режимов пере- и недокоммутации.*

Процесс коммутации машин постоянного тока (МПТ) подвержен влиянию множества внешних и внутренних факторов, что особенно сильно проявляется в нестационарных режимах работы. В то же время для оценки уровня искрения щеток МПТ в настоящее время используется ГОСТ 183-74, предполагающий субъективную оценку видимого искрения под сбегающим краем щетки, оцениваемого в баллах при испытаниях в стационарных режимах работы. Однако условия коммутации каждой отдельной секции якорной обмотки в машине зависят от сочетания воздействующих факторов, следовательно, процесс коммутации является случайным и может характеризоваться вероятностными оценками: видом закона распределения интенсивности искрения и его параметрами – математическим ожиданием, дисперсией [1].

Для определения диагностических параметров, позволяющих повысить достоверность диагностирования состояния коммутации МПТ, проведена математическая обработка экспериментальных данных коммутационных испытаний двигателя П2-630-202-8СУХЛ4 главного привода прокатного стана «800» ОАО «Чусовской металлургический завод» [2]. В процессе испытаний двигателя в нестационарных режимах работы цифровым накопителем информации при различных значениях тока подпитки добавочных полюсов фиксировались значения

тока якоря  $I_a$ , тока подпитки  $I_{\Pi}$ , частоты вращения  $n$  и интенсивности искрения  $I$  от пере- и недокоммутированных секций обмотки якоря.

Интенсивность искрения контролировалась с помощью прибора ПКК-5, работающего по сигналу со щетки-датчика. Анализ полученных данных проводился для различных режимов работы электродвигателя: при постоянном значении тока якоря, возрастании и спаде значения тока якоря. Для этого из экспериментальных данных выбирались участки с постоянным значением производной тока якоря (на рисунке 1 показан один из фрагментов экспериментальных осциллограмм). Для каждого выбранного режима работы электродвигателя строилась гистограмма распределения интенсивности искрения и рассчитывался средний уровень искрения. Сопоставление полученных результатов позволило сделать вывод о том, что величина математического ожидания интенсивности искрения определяет средний уровень искрения в целом по машине. Среднее квадратичное отклонение уровня искрения по коллектору  $\sigma_k$ , определяемое в том числе и состоянием профиля коллектора, а также магнитной системы машины остается практически неизменным в переходных режимах работы. В то же время изменение режима работы машины (увеличение или уменьшение значения тока якоря) приводит к изменению интенсивности искрения от оборота к обороту, а следовательно, к увеличению значения среднего квадратичного отклонения уровня искрения во времени  $\sigma_b$  [3]. Таким образом, использование помимо среднего уровня искрения  $I_{cp}$  двух предлагаемых параметров ( $\sigma_k$ ,  $\sigma_b$ ) представляется целесообразным, поскольку позволит повысить достоверность производимой объективной оценки состояния коммутации МПТ.

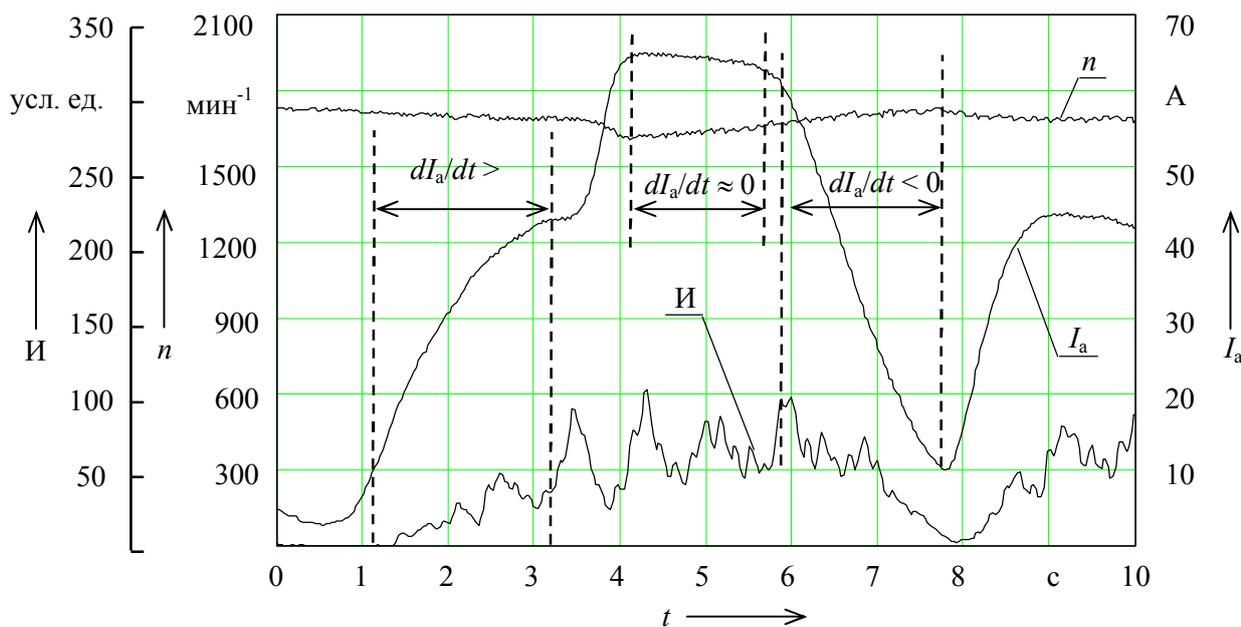


Рисунок 1 – Определение участков с постоянным значением производной тока  $dI_a/dt$

Для контроля предложенных параметров на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа усовершенствован прибор ПКК-5М (рисунок 2), обеспечивающий регистрацию изменения интенсивности искрения по коллектору за время испытания. Прибор выполнен на основе микроконтроллера ATmega 8535, управляющего работой всех элементов блока. Выходные сигналы аналогового блока прибора ПКК-5М, пропорциональные интенсивности искрения от недо- и перекоммутированных секций, поступают через входной согласующий блок на входы коммутатора аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера. Управляющая программа производит циклическое преобразование входных сигналов и выводит текущие значения измеренных диагностических параметров ( $I_{cp}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_k$ ) на жидкокристаллический индикатор. В процессе записи осуществляется сохранение измеренных значений в энергонезависимой flash-памяти блока, реализованной на микросхеме

Ramtron FM25256 для обеспечения возможной дальнейшей передачи информации в ЭВМ для более детального анализа.

С целью получения математических зависимостей, связывающих условия работы МПТ со значением уровня искрения и с параметрами, характеризующими закон распределения интенсивности искрения, проведены экспериментальные исследования, в процессе которых изменялись входные параметры, такие как ток якоря  $I_a$ , ток подпитки (отпитки) добавочных полюсов  $I_{\Pi}$  ( $I_0$ ), частота вращения  $n$  и скорость увеличения (уменьшения) тока якоря  $dI_a/dt$ . В качестве выходных приняты параметры закона распределения случайной величины интенсивности искрения от пере- и недокоммутированных секций – среднее значение интенсивности искрения  $I_{\text{ср}}$ , средние квадратичные отклонения интенсивности искрения по коллектору  $\sigma_k$  и во времени  $\sigma_v$ .



Рисунок 2 – Внешний вид прибора контроля качества коммутации ПКК-5М

Экспериментальная установка (рисунок 3) состояла из двух однотипных МПТ серии 2П, одна из которых работала в режиме двигателя с независимым возбуждением, другая – генератора, работающего на активную нагрузку  $R_n$ . С целью исключения возможных дополнительных случайных факторов, влияющих на возникновение искрения, была произведена предварительная настройка МПТ: проверено смещение щеток, их установка на геометрическую нейтраль, а также равномерное их распределение по окружности; выполнена предварительная притирка однотипных новых щеток и проверена сила нажатия пружин щеткодержателей (в том числе и с целью исключения значительного разброса в значениях переходных сопротивлений).

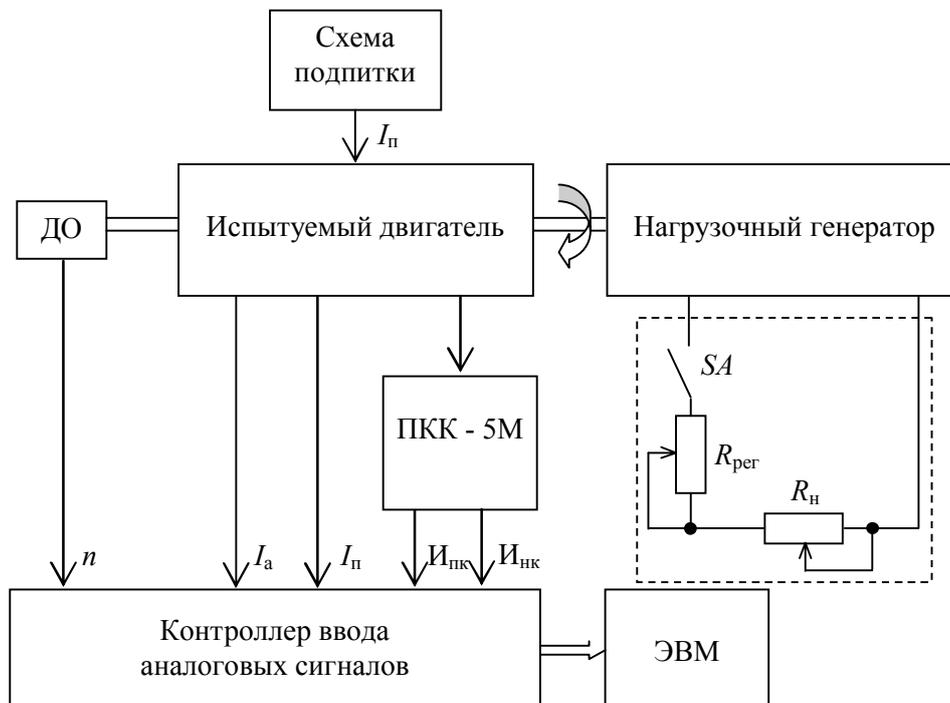


Рисунок 3 – Структурная схема экспериментальной установки

Необходимое значение производной тока якоря испытуемого двигателя задавалось изменением нагрузки генератора с помощью ключа  $SA$  и реостата  $R_{рег}$ . Уровень искрения от пере- и недокоммутированных секций  $I_{пк}$  и  $I_{нк}$  контролировался прибором ПКК-5М, работающим по сигналу со щетки-датчика, установленного на сбегающем крае рабочей щетки. Частота вращения двигателя  $n$  определялась по импульсам, сформированным оптическим датчиком оборотов (ДО). Аналоговые сигналы подавались на вход контроллера ввода аналоговых сигналов, выход которого подключался к ЭВМ и при помощи специализированного программного обеспечения осуществлялось формирование массивов данных.

Определение коэффициентов уравнений регрессии осуществлялось с помощью математического аппарата метода планирования эксперимента [4]. Интервалы варьирования входных параметров представлены в таблицах 1 и 2. Откликом системы на входные воздействия принимались значения  $I_{ср}$  от пере- и недокоммутированных секций, среднее квадратичное отклонение интенсивности искрения по коллектору  $\sigma_k$  и во времени  $\sigma_b$ . Для четырех входных факторов формировались матрицы планирования полного факторного эксперимента как для пере-, так и для недокоммутации.

Таблица 1 – Интервалы варьирования входных параметров при подпитке

Входные параметры	$I_p, A$	$I_a, A$	$n, \text{мин}^{-1}$	$dI_a/dt, A/c$
Кодовые обозначения	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Основной уровень	2,25	7	1750	0
Интервал варьирования	0,75	5	250	25
Верхний уровень	3	12	2000	25
Нижний уровень	1,5	2	1500	- 25

Анализ полученных данных проводился для различных режимов работы испытуемого двигателя: при постоянном значении тока якоря, возрастании и спаде значения тока якоря. Для этого из экспериментальных данных выбирались участки с постоянным значением производной тока якоря.

Таблица 2 – Интервалы варьирования входных параметров при отпитке

Входные параметры	$I_p, A$	$I_a, A$	$n, \text{мин}^{-1}$	$dI_a/dt, A/c$
Кодовые обозначения	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Основной уровень	0,5	7	1750	0
Интервал варьирования	- 2,5	5	250	25
Верхний уровень	- 2	12	2000	25
Нижний уровень	- 3	2	1500	- 25

Для каждого выбранного режима работы испытуемого двигателя строилась гистограмма распределения интенсивности искрения и рассчитывался средний уровень искрения. В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии в кодированных величинах.

Уравнения регрессии среднего уровня искрения МПТ имеют следующий вид:

для перекоммутации –

$$I_{ср.пк} = 22,120 + 17,446x_1 - 2,405x_2 + 2,487x_3 + 1,893x_4 - 3,295x_1x_2 + 2,587x_1x_3 + 1,207x_1x_4 + 3,053x_2x_3 + 1,850x_2x_4 + 0,086x_3x_4; \quad (1)$$

для недокоммутации –

$$I_{\text{ср.нк}} = 11,903 - 7,065x_1 - 3,094x_2 + 1,735x_3 - 0,099x_4 + 3,501x_1x_2 - 2,117x_1x_3 + 0,067x_1x_4 - 0,932x_2x_3 - 0,367x_2x_4 - 0,076x_3x_4. \quad (2)$$

Получены также уравнения регрессии в кодированных величинах, связывающие входные параметры со значениями среднего квадратичного отклонения интенсивности искрения по коллектору  $\sigma_{\text{к}}$ :

для перекоммутации –

$$\sigma_{\text{к.пк}} = 3,574 + 2,225x_1 - 0,342x_2 - 0,063x_3 + 0,317x_4 - 0,486x_1x_2 + 0,196x_1x_3 + 0,157x_1x_4 + 0,702x_2x_3 + 0,203x_2x_4 + 0,050x_3x_4; \quad (3)$$

для недокоммутации –

$$\sigma_{\text{к.нк}} = 2,559 - 1,320x_1 - 0,217x_2 + 0,200x_3 - 0,101x_4 + 0,256x_1x_2 - 0,221x_1x_3 + 0,059x_1x_4 + 0,142x_2x_3 - 0,177x_2x_4 + 0,071x_3x_4 \quad (4)$$

и среднего квадратичного отклонения во времени  $\sigma_{\text{в}}$ :

для перекоммутации –

$$\sigma_{\text{в.пк}} = 4,832 + 2,986x_1 + 1,343x_2 - 0,412x_3 + 0,491x_4 + 0,352x_1x_2 - 0,736x_1x_3 + 0,509x_1x_4 - 0,068x_2x_3 + 0,442x_2x_4 - 0,206x_3x_4; \quad (5)$$

для недокоммутации –

$$\sigma_{\text{в.нк}} = 4,152 - 2,857x_1 + 0,912x_2 + 0,755x_3 - 0,138x_4 - 0,845x_1x_2 - 0,780x_1x_3 + 0,096x_1x_4 + 0,103x_2x_3 + 0,030x_2x_4 - 0,139x_3x_4. \quad (6)$$

Проверка адекватности полученных уравнений регрессии проводилась на 5 %-ном уровне значимости по  $F$ -критерию Фишера, при этом расчетные значения (приведены в таблице 3) оказались меньше табличного значения  $F_{\text{кр}} = 19,3$  (для двух степеней свободы при оценке дисперсии воспроизводимости и пяти степеней свободы при оценке дисперсии адекватности).

Таблица 3 – Результаты расчета доверительного интервала и  $F$ -критерия Фишера для полученных моделей

Регрессионная модель	$I_{\text{ср.пк}}$	$I_{\text{ср.нк}}$	$\sigma_{\text{к.пк}}$	$\sigma_{\text{к.нк}}$	$\sigma_{\text{в.пк}}$	$\sigma_{\text{в.нк}}$
$F$ -критерий Фишера (расчетное значение)	8,947	14,425	8,737	0,478	17,236	1,191
Доверительный интервал коэффициента регрессии	1,028	0,269	0,179	0,331	0,117	0,09

Оценка значимости коэффициентов регрессии проводилась путем сравнения абсолютной величины коэффициентов уравнений со значением доверительного интервала (см. таблицу 2), определяемого с помощью критерия Стьюдента (для принятого уровня значимости 5 % и двух степеней свободы значение  $t$ -критерия составило 4,3).

В результате проведенных преобразований и упрощения модели путем исключения незначимых слагаемых получены уравнения регрессии среднего уровня искрения МПТ, имеющие следующий вид после перехода от кодированных обозначений к натуральным:

для перекоммутации –

$$I_{\text{ср.пк}} = 22,12 + 5,265I_{\text{н}} - 2,778I_{\text{а}} - 0,038n - 0,173(dI_{\text{а}} / dt) - 0,879I_{\text{н}}I_{\text{а}} + 0,014I_{\text{н}}n + 0,064I_{\text{н}}(dI_{\text{а}} / dt) + 0,002I_{\text{а}}n + 0,015I_{\text{а}}(dI_{\text{а}} / dt); \quad (7)$$

для недокоммутации –

$$I_{\text{ср.нк}} = 9,229 + 5,711I_o + 4,188I_a - 0,03n + 1,401I_oI_a - 0,017I_on - 0,0007I_an - 0,0014I_a(dI_a/dt). \quad (8)$$

Получены также уравнения регрессии, связывающие входные параметры со значениями среднего квадратичного отклонения интенсивности искрения по коллектору  $\sigma_k$ :

для перекоммутации –

$$\sigma_{\text{к.пк}} = -4,665 + 5,869I_{\text{п}} - 0,4915I_a + 0,0013(dI_a/dt) - 0,130I_{\text{п}}I_a - 0,0011I_{\text{п}}n + 0,0004I_an + 0,0016I_a(dI_a/dt); \quad (9)$$

для недокоммутации –

$$\sigma_{\text{к.нк}} = 2,21 - 0,26I_o + 0,013I_a - 0,004n + 0,006(dI_a/dt) + 0,103I_oI_a - 0,0018I_on + 0,0001I_an - 0,0014I_a(dI_a/dt) \quad (10)$$

и среднего квадратичного отклонения во времени  $\sigma_b$ :

для перекоммутации –

$$\sigma_{\text{в.пк}} = -17,095 + 10,19I_{\text{п}} + 0,0574I_a + 0,0072n - 0,0662(dI_a/dt) + 0,0939I_{\text{п}}I_a - 0,0039I_{\text{п}}n + 0,0272I_{\text{п}}(dI_a/dt) + 0,0035I_a(dI_a/dt); \quad (11)$$

для недокоммутации –

$$\sigma_{\text{в.нк}} = 16,537 + 7,578I_o - 0,663I_a - 0,013n + 0,033(dI_a/dt) - 0,338I_oI_a - 0,0062I_on - 0,00002n(dI_a/dt). \quad (12)$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что на величину среднего уровня интенсивности искрения  $I_{\text{ср}}$  наибольшее влияние оказывает ток подпитки, характеризующий отклонения магнитной системы. Величина среднего квадратичного значения уровня искрения по времени  $\sigma_b$  в значительной степени зависит от производной тока якоря двигателя. Значение среднего квадратичного отклонения по коллектору  $\sigma_k$  в большой степени определяется состоянием профиля коллектора.

Полученные регрессионные уравнения (7) – (12) могут быть использованы при формировании алгоритма диагностирования состояния коммутации МПТ серии 2П, что позволяет повысить достоверность определения возможных причин неудовлетворительной работы электрических машин данной серии. Представленная модель может быть уточнена для каждого конкретного типа МПТ или их серий путем использования предложенной аппаратной, программной части и представленного математического аппарата.

## Список литературы

1. Авилов, В. Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока. [Текст] / В. Д. Авилов. – М.: Энергоиздат, 1995. – 237 с.
2. Диагностирование и настройка коммутации двигателей постоянного тока главных приводов прокатных станов [Текст] / В. Д. Авилов, Е. Н. Савельева и др. // Промышленная энергетика. 2003. – № 10. – С. 15 – 19.
3. Выбор диагностических параметров для оценки состояния коммутации машин постоянного тока в условиях нестационарных режимов работы [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун и др. // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. / Томский политехн. ун-т. – Томск, 2009. – С. 33 – 37.
4. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

М. А. Карабанов

## СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В МОМЕНТЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

*В статье рассматривается проблема провалов напряжения на шинах 10 и 0,4 кВ при подключении преобразовательных агрегатов. Установлено, что в ряде случаев провалы напряжения превышали 30 % и что обусловлены они броском тока включения в тяговом трансформаторе, кратность которого составляла  $5I_{ном}$ .*

*С целью минимизации бросков тока включения было выполнено математическое моделирование бросков тока при включении однофазного и тягового трехфазного трансформаторов с учетом нелинейной характеристики намагничивания стали магнитопровода, в результате которого установлено, что величина броска тока зависит от сочетания углов отключения и включения относительно синусоиды опорного напряжения.*

*На основе полученной зависимости было изготовлено устройство синхронного включения тягового трансформатора, за счет использования которого на действующей тяговой подстанции Западно-Сибирской железной дороги удалось существенно снизить броски тока включения и тем самым значительно повысить качество электрической энергии питания нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях.*

В последние годы на железнодорожном транспорте наблюдается повышение весовых норм поездов, что вызывает увеличение тяговых нагрузок и, как следствие, более частое автоматическое подключение на тяговых подстанциях резервных преобразовательных агрегатов (ПА) параллельно работающим. Эти моменты сопровождаются провалами напряжения на шинах 10 кВ, к которым подключаются преобразовательные агрегаты. От этих шин получают питание и нетяговые районные и линейные железнодорожные нагрузки, в том числе устройства СЦБ и связи. В ряде случаев величина провала напряжения превышает 30 %, что не удовлетворяет требованиям ГОСТ 13109-97 (ГОСТ) и Правил технической эксплуатации железных дорог РФ (ПТЭ).

В отдельные моменты наблюдаются сбои и отказы в работе современной микропроцессорной и электронной аппаратуры нетяговых потребителей. Например, в работе устройств СЦБ и связи наблюдались случаи излишних переходов с основного питания на резервное и обратно, ложных срабатываний КТСМ и УКСПС, перекрытий маневровых сигналов, сбоев в работе цифровой аппаратуры, отключения фидеров нетяговых потребителей. Это вызывает нарушение технологического процесса, приводит к потере информации, ложному срабатыванию устройств, а также к снижению безопасности движения поездов.

В связи с многократными случаями сбоев и отказов электронной аппаратуры нетяговых потребителей, обусловленных провалами напряжения, на Западно-Сибирской железной дороге были проведены измерения провалов напряжения в моменты подключения ПА на шинах 10 кВ и шинах собственных нужд 0,4 кВ, к которым подключены трансформаторы СЦБ [1, 2].

В ходе эксперимента было проведено более 100 включений преобразовательных агрегатов. По результатам статистической обработки данных было выявлено, что в 66 % случаев подключения ПА происходит снижение величины напряжения ниже предельно допустимого значения, которое регламентируется ГОСТ и ПТЭ [1,2].

В результате исследований было установлено экспериментально и подтверждено теоретически [3], что причиной провалов напряжения являются броски тока в тяговом трансформаторе (ТТ) в моменты подключения ПА, которые в ряде случаев составляли  $5I_{ном}$ .

Кроме этого броски тока при подключении способствуют ложному отключению тягового трансформатора из-за срабатывания релейной защиты, а также создают электродинамические силы, соизмеримые с силами при коротком замыкании, а в ряде случаев, превышающие их, что приводит к деформации обмоток с кумулятивным эффектом.

Природа возникновения бросков тока включения объясняется переходом стали магнитопровода ТТ из ненасыщенного состояния в насыщенное и зависит от геометрических особенностей трансформатора, технических характеристик стали, момента подключения трансформатора к сети относительно синусоиды напряжения, величины и знака остаточной индукции в стержнях магнитопровода [3 – 5].

Остаточная индукция определяется параметрами магнитопровода, параметрами цепи и внешними факторами, к которым относятся, например, намагничивание трансформатора после проведения высоковольтных испытаний и измерения на нем электрического сопротивления обмотки на постоянном токе, а также момент отключения трансформатора от сети относительно синусоиды питающего напряжения [4]. Изменять конструкцию магнитопровода, схему шихтовки, тип стыка и марку стали ТТ, а также параметры сети, выключатель, эквивалентную емкость обмоток и ошиновок между выключателем и трансформатором на действующих тяговых подстанциях не представляется возможным, поэтому наиболее эффективным средством снижения бросков тока включения является управление моментом подключения трансформатора к сети относительно синусоиды питающего напряжения при благоприятном значении остаточной индукции.

Зависимость остаточной индукции  $B_r$  от максимальной индукции  $B_m$  для шихтованных магнитопроводов, выполненных, в том числе, из стали марки 3413 (Э330), по данным работ [3, 4, 6, 7] приведена на рисунке 1.

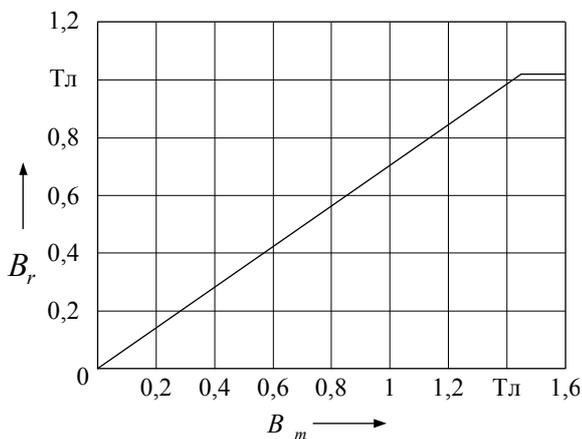


Рисунок 1 – Зависимость остаточной индукции от максимальной индукции

Следует отметить, что эта зависимость симметрична относительно начала координат для области отрицательных значений. При отключении остаточная индукция для конкретного ТТ зависит от момента исчезновения тока относительно синусоиды питающего напряжения. Из рисунка 1 видно, что в области малых рабочих индукций  $B_m < 1,43$  Тл остаточная индукция представляет собой зависимость  $B_r = 0,7B_m$ , а при  $B_m > 1,43$  Тл остаточная индукции  $B_r \approx 1$ Тл.

Анализ переходных процессов в трехфазном трансформаторе значительно сложнее, чем в однофазном. Однако многие качественные характеристики процесса не зависят от исполнения трансформаторов. Поэтому для построения модели

трехфазного тягового трансформатора была сформулирована основа метода расчета бросков тока включения на примере однофазного трансформатора.

Однофазный трансформатор (рисунок 2) описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, составленной по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} u_1 = r_1 \cdot i_1 + \frac{d\psi_{1\text{общ}}}{dt}; \\ 0 = r_2 \cdot i_2 + R_n \cdot i_2 + \frac{d\psi_{2\text{общ}}}{dt} + L_n \frac{di_2}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_1$  – напряжение питающей сети;

$r_1, r_2$  – активное сопротивление первичной и вторичной обмоток;

$i_1, i_2$  – ток первичной и вторичной обмоток;

$\psi_{1\text{общ}}, \psi_{2\text{общ}}$  – общее потокосцепление первичной и вторичной обмоток;

$R_n$  – активное сопротивление нагрузки;

$L_n$  – индуктивность нагрузки.

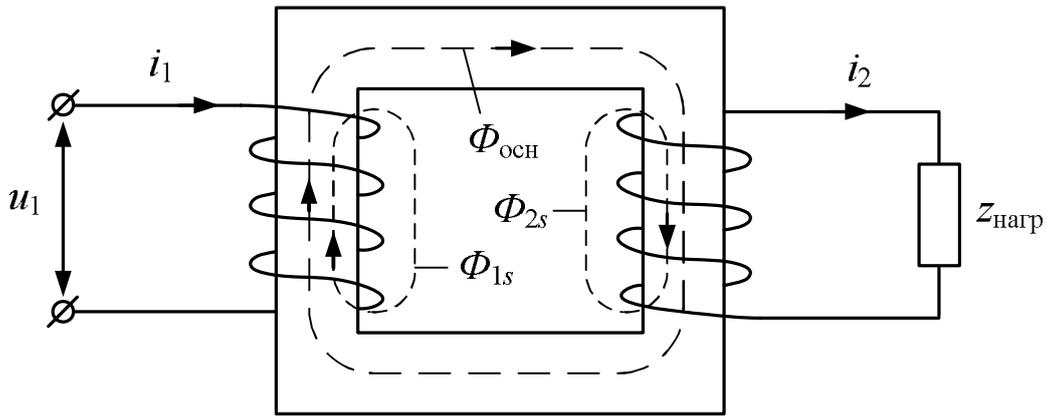


Рисунок 2 – Схема однофазного трансформатора с нагрузкой

Для качественного анализа переходного процесса и повышения точности расчета по известным точкам  $B$  и  $H$  вычисляются коэффициенты кубических сплайнов и получаются сплайновые аппроксимации зависимости  $H(B)$  (рисунок 3, а) и зависимости общего потокосцепления от тока (рисунок 3, б).

Систему нелинейных уравнений (1) удобно представить в виде матрицы. С учетом выполненных преобразований определяются коэффициенты  $L$ :

$$\begin{cases} L_{11} = L_s + W_1^2 \frac{S}{l} \frac{\partial B}{\partial H}; \\ L_{12} = L_{21} = W_1 \cdot W_2 \frac{S}{l} \frac{\partial B}{\partial H}; \\ L_{22} = L_n + L_s + W_2^2 \frac{S}{l} \frac{\partial B}{\partial H}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $L_s$  – индуктивность рассеяния, которая обусловлена параметрами обмотки и стержня магнитопровода;

$W_1, W_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток;

$S$  – площадь поперечного сечения стержня;

$l$  – длина средней силовой линии.

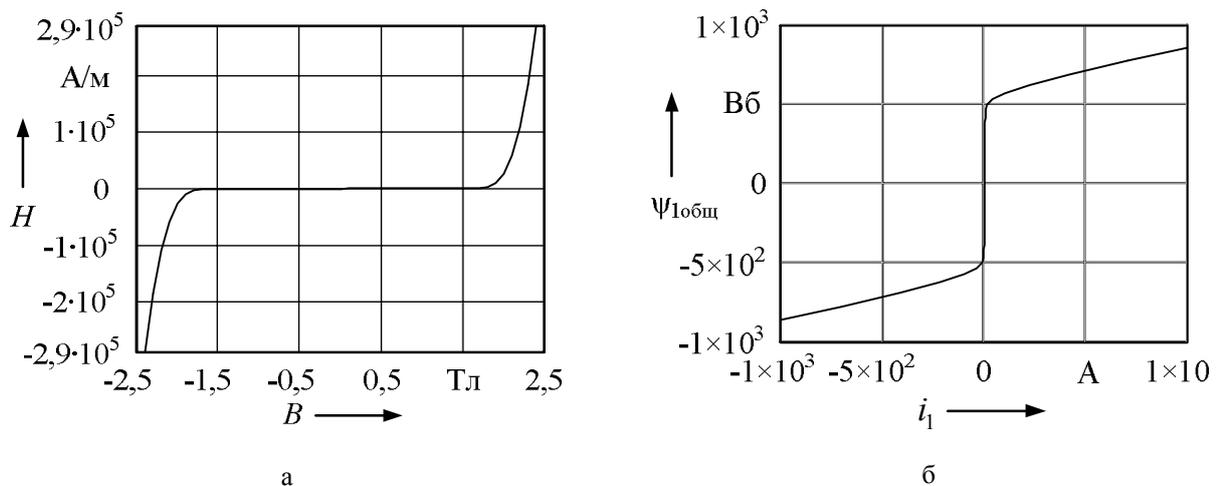


Рисунок 3 – Графическое представление сплайновой аппроксимации зависимости  $H(B)$ (а) и  $\Psi_{1общ}(i_1)$  (б)

Преобразовав систему выражений (1) с учетом коэффициентов (2), получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, представленных в матричном виде:

$$\left| \frac{di}{dt} \right| = |L|^{-1} \cdot |U|, \quad (3)$$

правая часть которого приведена к форме Коши. Задаваясь начальными условиями, одно из которых время  $t = 0$ , а другое определяется остаточной индукцией, решаем систему (3) методом Рунге – Кутты четвертого порядка.

В результате этого решения получаем переходный процесс для режима холостого хода при моментах отключения  $\varphi_{\text{откл}} = 180^\circ$  и включения  $\varphi_{\text{вкл}} = 0^\circ$ , изображенный на рисунке 4, а. Изменяя угол включения при неизменном угле отключения ( $\varphi_{\text{откл}} = 180^\circ$ ,  $\varphi_{\text{вкл}} = 90^\circ$ ) и повторяя решение системы уравнений (3), получаем переходный процесс (рисунок 4, б) с меньшей величиной броска тока.

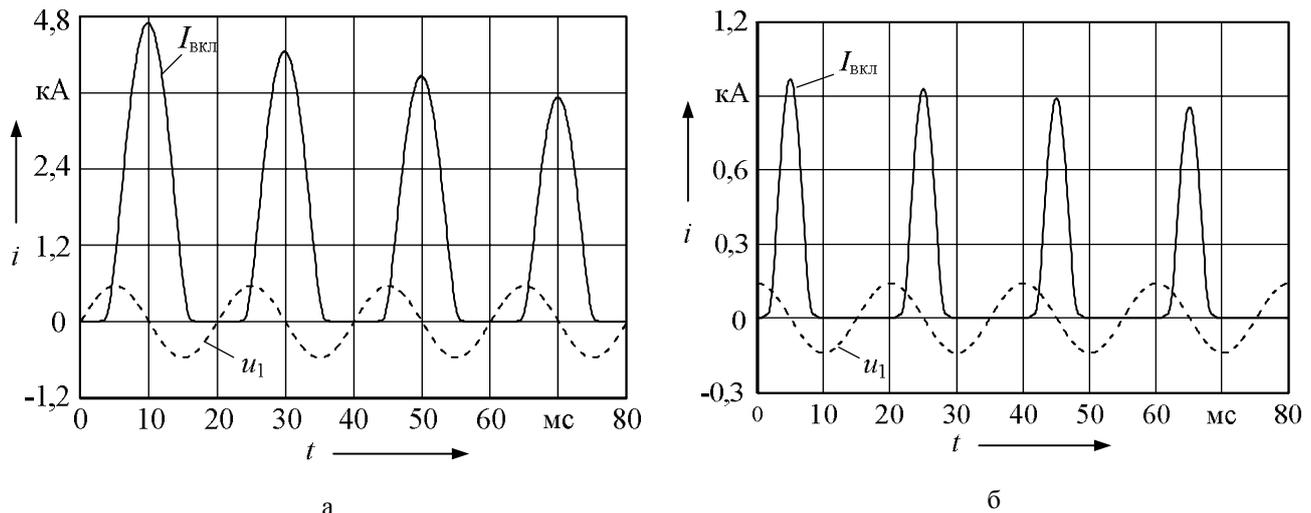


Рисунок 4 – Кривые броска тока и напряжения при включении трансформатора на холостой ход:  
а – при  $\varphi_{\text{откл}} = 180^\circ$ ,  $\varphi_{\text{вкл}} = 0^\circ$ ; б – при  $\varphi_{\text{откл}} = 180^\circ$ ,  $\varphi_{\text{вкл}} = 90^\circ$

Специфика расчета тягового трансформатора заключается в том, что требует рассмотрения как магнитной (рисунок 5), так и электрической (рисунок 6) схем замещения.

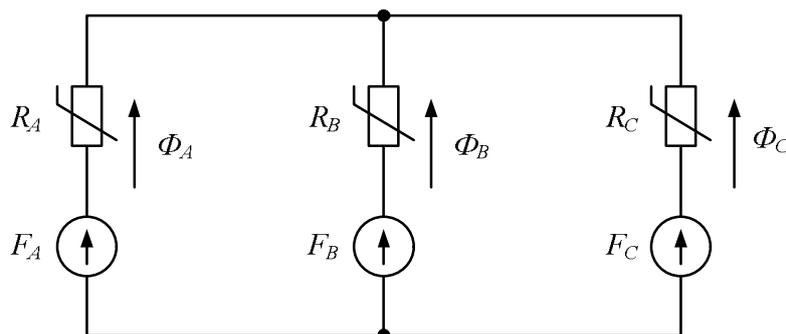


Рисунок 5 – Магнитная схема замещения трехфазного трехстержневого тягового трансформатора

Для расчета магнитной схемы замещения необходимо задавать значения токов обмоток, которые можно получить только после расчета электрической схемы. При этом расчет электрической схемы опирается на предварительно известные параметры магнитной схемы. Для разрешения указанных взаимозависимостей предлагается расчеты магнитной и электрической схем замещения разнести во времени. На первом этапе осуществляется серия расчетов магнитной цепи при различных сочетаниях намагничивающих сил стержней  $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ :

$$\begin{cases} F_A = i_{1A} \cdot W_1 + i_{2a} \cdot W_2; \\ F_B = i_{1B} \cdot W_1 + i_{2b} \cdot W_2; \\ F_C = i_{1C} \cdot W_1 + i_{2c} \cdot W_2, \end{cases} \quad (4)$$

где  $i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}, i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}$  – ток первичной и вторичной обмоток фаз  $A, B, C$  соответственно.

Схема, изображенная на рисунке 5, содержит нелинейные магнитные сопротивления  $R_A, R_B, R_C$ , представляющие собой пути магнитных потоков в стержнях магнитопровода. Для этой схемы составляется система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для магнитных цепей:

$$\begin{cases} F_A - F_B = R_A \cdot \Phi_A - R_B \cdot \Phi_B; \\ F_B - F_C = R_B \cdot \Phi_B - R_C \cdot \Phi_C; \\ \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Магнитное сопротивление каждого стержня определяется по формуле [8]:

$$R = \frac{\partial H}{\partial B} \frac{l}{S}. \quad (6)$$

При допущении равенства плотностей тока в первичных и вторичных обмотках считается, что обмотки, расположенные на одном и том же стержне, создают единую намагничивающую силу  $F$ . Изменяя значения токов  $i_1$  и  $i_2$  от  $-i_{1min}$  и  $-i_{2min}$  до  $+i_{1max}$ ,  $+i_{2max}$  соответственно при различных сочетаниях для фаз  $A, B$  и  $C$ , рассчитываем параметры магнитной схемы замещения. Результатом расчета магнитной схемы являются магнитные потоки стержней  $\Phi_A, \Phi_B, \Phi_C$  в зависимости от сочетания намагничивающих сил:

$$\begin{cases} \Phi_A = f(F_A, F_B, F_C); \\ \Phi_B = f(F_A, F_B, F_C); \\ \Phi_C = f(F_A, F_B, F_C). \end{cases} \quad (7)$$

Полученные матрицы магнитного потока (7) аппроксимируются трехмерным кубическим сплайном. В результате такой аппроксимации при любом сочетании токов в обмотках можно найти все частные производные функций (6), (7), а также потокосцепление обмоток. По полученным результатам проводится расчет электрической схемы замещения. Так как с точки зрения физики процесса число и параметры вторичных обмоток, расположенных поверх первичной обмотки, не оказывают существенного влияния на величину броска тока, то расчет производится на примере тягового трансформатора  $Y/Y$ . Для этого на основе законов Кирхгофа записывается система уравнений для схемы, приведенной на рисунке 6 [9].

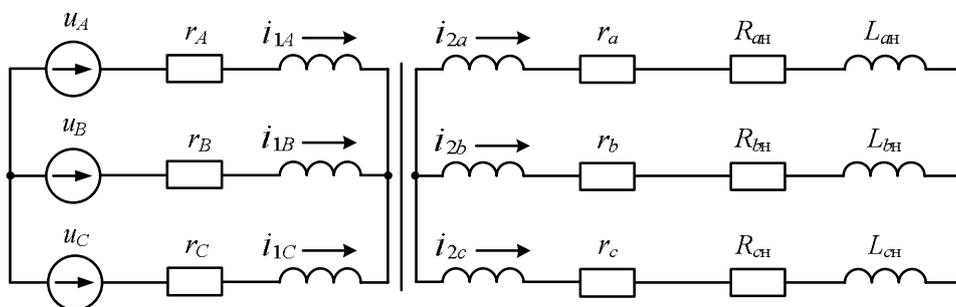


Рисунок 6 – Электрическая схема замещения тягового трансформатора с соединением обмоток  $Y/Y$

$$\begin{cases} u_A - u_B = i_{1A} \cdot r_A + W_1 \frac{d\Phi_A}{dt} - i_{1B} \cdot r_B - W_1 \frac{d\Phi_B}{dt}; \\ u_B - u_C = i_{1B} \cdot r_B + W_1 \frac{d\Phi_B}{dt} - i_{1C} \cdot r_C - W_1 \frac{d\Phi_C}{dt}; \\ 0 = i_{2a}(r_a + R_{ан}) + W_2 \frac{d\Phi_A}{dt} + L_{ан} \frac{di_{2a}}{dt} - i_{2b}(r_b + R_{бн}) - W_2 \frac{d\Phi_B}{dt} - L_{бн} \frac{di_{2b}}{dt}; \\ 0 = i_{2b}(r_b + R_{бн}) + W_2 \frac{d\Phi_B}{dt} + L_{бн} \frac{di_{2b}}{dt} - i_{2c}(r_c + R_{сн}) - W_2 \frac{d\Phi_C}{dt} - L_{сн} \frac{di_{2c}}{dt}; \\ i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0; \\ i_{2a} + i_{2b} + i_{2c} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где  $u_A, u_B, u_C$  – напряжение фаз  $A, B, C$ ;

$r_A, r_B, r_C, r_a, r_b, r_c$  – активные сопротивления первичных обмоток фаз  $A, B, C$  и вторичных обмоток фаз  $a, b, c$ ;

$R_{ан}, R_{бн}, R_{сн}$  – активное сопротивление нагрузки;

$L_{ан}, L_{бн}, L_{сн}$  – индуктивность нагрузки.

При выполнении преобразований с учетом выражения (2) система уравнений (8) принимает вид системы дифференциальных уравнений в форме Коши (3):

$$\left[ \frac{di}{dt} \right] = \begin{bmatrix} \frac{di_{1A}}{dt} & \frac{di_{1B}}{dt} & \frac{di_{1C}}{dt} & \frac{di_{2a}}{dt} & \frac{di_{2b}}{dt} & \frac{di_{2c}}{dt} \end{bmatrix}^T; \quad (9)$$

$$[U] = \begin{bmatrix} u_A - u_B - r_A \cdot i_{1A} + r_B \cdot i_{1B} \\ u_B - u_C - r_B \cdot i_{1B} + r_C \cdot i_{1C} \\ -i_{2a}(r_a + R_{ан}) + i_{2b}(r_b + R_{бн}) \\ -i_{2b}(r_b + R_{бн}) + i_{2c}(r_c + R_{сн}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{AA} - L_{BA} & L_{AB} - L_{BB} & L_{AC} - L_{BC} & L_{Aa} - L_{Ba} & L_{Ab} - L_{Bb} & L_{Ac} - L_{Bc} \\ L_{BA} - L_{CA} & L_{BB} - L_{CB} & L_{BC} - L_{CC} & L_{Ba} - L_{Ca} & L_{Bb} - L_{Cb} & L_{Bc} - L_{Cc} \\ L_{aA} - L_{bA} & L_{aB} - L_{bB} & L_{aC} - L_{bC} & L_{aa} - L_{ba} + L_{на} & L_{ab} - L_{bb} - L_{нб} & L_{ac} - L_{bc} \\ L_{bA} - L_{cA} & L_{bB} - L_{cB} & L_{bC} - L_{cC} & L_{ba} - L_{ca} & L_{bb} - L_{cb} + L_{нб} & L_{bc} - L_{cc} - L_{нс} \\ dt & dt & dt & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & dt & dt & dt \end{bmatrix}. \quad (11)$$

С учетом выражений (9) – (11) выполняется решение система уравнений (3) методом Рунге – Кутты четвертого порядка. На каждом шаге интегрирования определяются намагничивающие силы стержней (4) в каждый момент времени, затем находятся частные производные потокосцепления, после чего вычисляются коэффициенты матрицы (11) и проводится расчет переходного процесса для разных режимов и разных сочетаний углов отключения и включения.

В результате выполнения расчета кратности броска тока включения в первый период при различных сочетаниях углов  $\varphi_{откл}$  и  $\varphi_{вкл}$  в диапазоне от 0 до 360° была получена поверхность кратности броска тока для одной фазы (рисунок 7). Для двух других фаз эта зависимость абсолютно идентичная.

Из графика на рисунке 7 видно, что наряду с такими областями, где бросок тока макси-

мален, существуют геометрические места точек, в которых бросок тока отсутствует или величина его минимальна.

На основании полученной зависимости предложен способ включения трансформатора при оптимальном сочетании углов отключения и включения, позволяющий снизить броски тока при включении как на холостой ход, так и на нагрузку. Следует отметить, что максимальный эффект от предлагаемого способа возможен при стабильных динамических характеристиках вакуумного выключателя, который должен обеспечивать точность выполнения условия  $\varphi_{\text{откл}} = \varphi_{\text{вкл}}$ .

Определим ширину благоприятного участка, где броски тока не выше номинального. Для этого проведем диагональ из точки  $\varphi_{\text{откл}} = 0^\circ$ ,  $\varphi_{\text{вкл}} = 0^\circ$  в точку, где  $\varphi_{\text{откл}} = 360^\circ$ ,  $\varphi_{\text{вкл}} = 360^\circ$  (см. рисунок 7) и спроецируем поверхность на плоскость, перпендикулярную этой диагонали (рисунок 8).

Из проекции, приведенной на рисунке 8, видно, что кратность тока, равная 1, обеспечивается при отклонении от оптимального сочетания углов включения и отключения на угол  $\pm 24^\circ$  ( $\pm 1,3$  мс). Кратность тока, не превышающая 2, обеспечивается при отклонении  $\pm 33^\circ$  ( $\pm 1,8$  мс). Эти величины крайне важны с практической точки зрения: они определяют требования к стабильности временных характеристик коммутационного аппарата.

На основании полученной зависимости с целью минимизации бросков тока включения был предложен способ и на его основе разработано устройство синхронного включения тягового трансформатора (УСВТ), которое прошло опытную эксплуатацию на действующей тяговой подстанции Западно-Сибирской железной дороги.

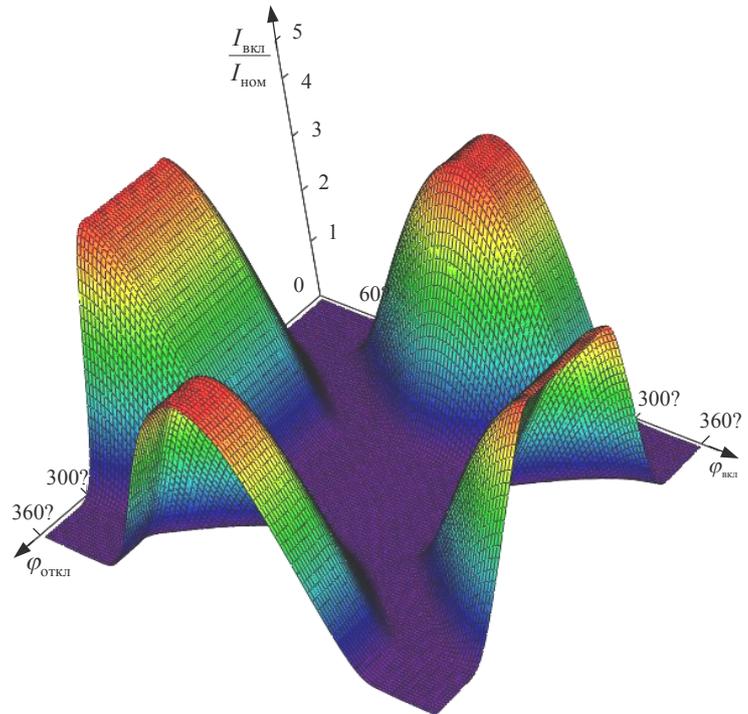


Рисунок 7 – Кратность броска тока в первый период после включения трансформатора в зависимости от сочетания углов включения и отключения

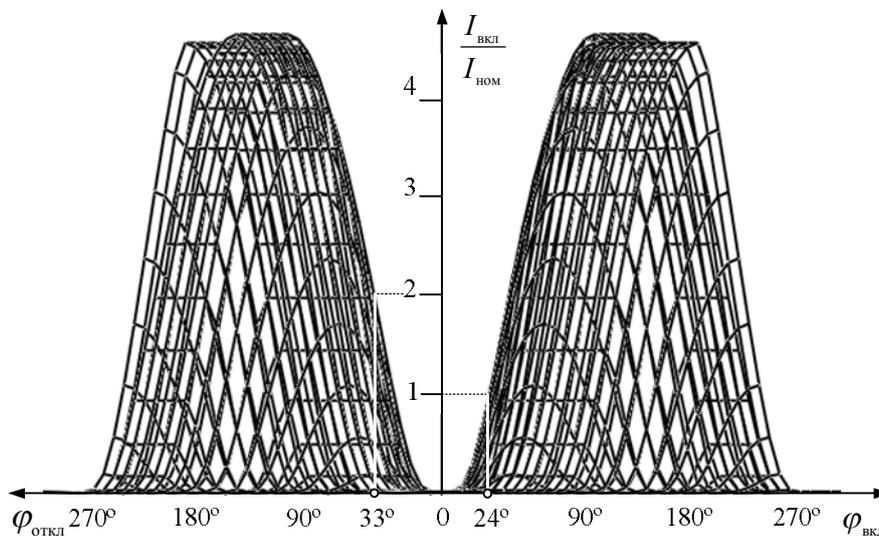


Рисунок 8 – Проекция поверхности кратности броска тока при разном сочетании углов включения и отключения

Суть способа заключается в следующем. Отключение трансформатора происходит без задержки по времени (мгновенно) с учетом собственного времени срабатывания высоковольтного выключателя. При этом запоминается, в какой момент времени, отсчитываемый от начала периода возрастания напряжения сети в одной из ее фаз, которая является опорной, произошло отключение. Замыкание контактов выключателя при очередном подключении трансформатора к сети производится в такой же момент времени, отсчитываемый от такого же, как в предшествующем отключении, начала периода возрастания напряжения в той же самой опорной фазе сети. Это приводит к тому, что площадь синусоиды индукции, которая оказывается в первый период включения выше области насыщения, незначительна, поэтому величина тока включения в таких случаях не превышает значения номинального тока для трансформатора.

Устройство подключается к цепям управления преобразовательного агрегата и измерения напряжения опорной фазы и не требует изменений в силовой схеме объекта. Блочно-модульная схема устройства 6 и схема подключения к силовой части цепи приведены на рисунке 9.

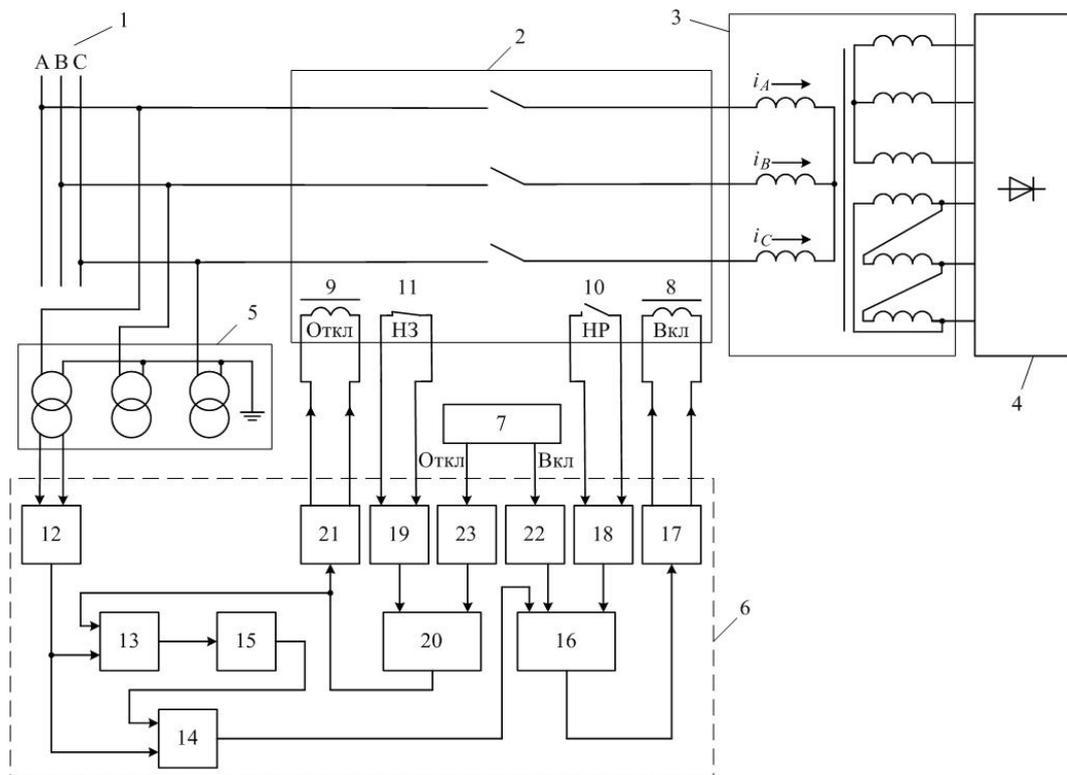


Рисунок 9 – Блочно-модульная схема устройства синхронного включения тягового трансформатора

Каждое очередное подключение преобразовательного агрегата (трансформатора 3 и выпрямительной схемы 4) к шинам 1 выключателем 2 осуществляется через устройство УСВТ 6 [10]. Для этого на преобразователь 22 контактных сигналов в логические сигналы подается сигнал от системы управления 7, а на преобразователь контактных сигналов в логические сигналы 18 – сигнал о положении выключателя с нормально разомкнутого блок-контакта 10. От преобразователей 22 и 18 сигналы поступают на логический элемент «И» 16, а он дает команду на включение только при поступлении на него сигнала от формирователя сигналов управления 14. В блок 15 настройки момента включения выключателя поступает информация о моменте отключения из запоминающего устройства 13. Блок настройки в диапазоне 20 мс ( $360^\circ$ ) формирует задержку по времени так, чтобы с учетом собственного времени срабатывания выключателя 2 замыкание контактов происходило в такой же момент относительно синусоиды опорного напряжения  $U_A$ , что и при отключении, которое отсчитывается от такого же, как в предшествующем отключении, начала периода изменения напряжения с по-

ложительной производной. Эта информация поступает на формирователь сигналов 14, который подает управляющий сигнал на логический элемент «И» 16 который при наличии подтверждающих сигналов от преобразователей 22 и 18 разрешает прохождение команды включения на короткозамыкатель 17 для срабатывания катушки 8 привода выключателя. При готовности выключателя 2 (контролируется по его блок-контакту 10) и наличии команды на его отключение короткозамыкатель 17 подключает постоянное напряжение 110 В к катушке 8 и происходит включение выключателя 2.

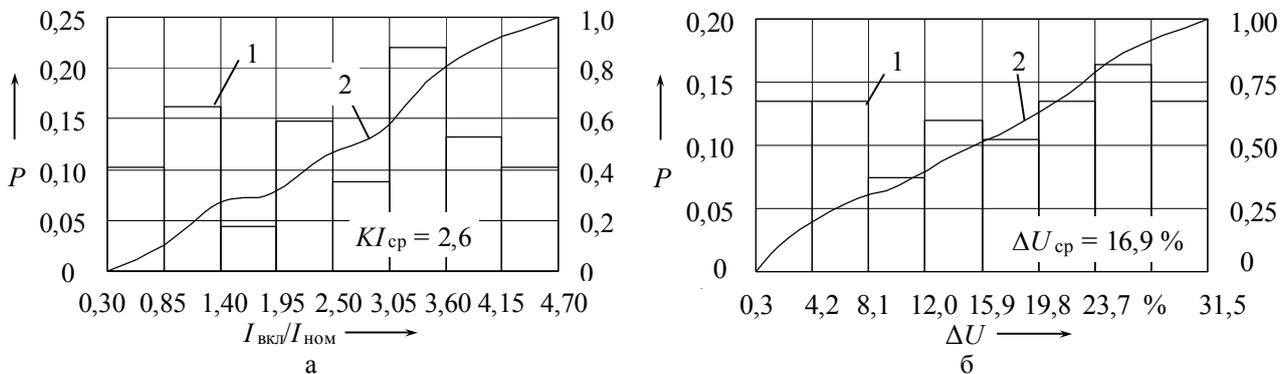


Рисунок 10 – Дифференциальная (1) и интегральная (2) функции распределения кратности броска тока включения (а) и величины провала напряжения (б) при управлении ПА без УСВТ

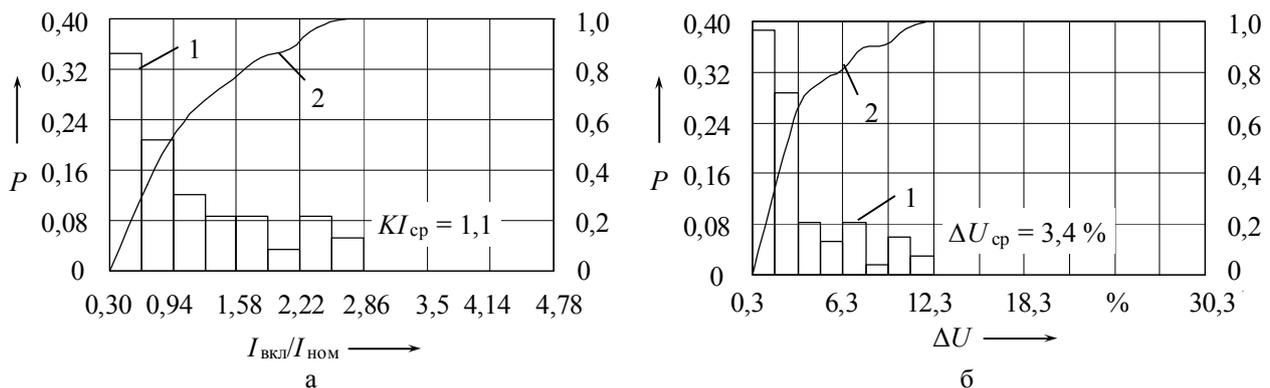


Рисунок 11 – Дифференциальная (1) и интегральная (2) функции распределения кратности броска тока включения (а) и величины провала напряжения (б) при управлении ПА с помощью УСВТ

За полгода эксплуатации опытного образца на одной из тяговых подстанции Западно-Сибирской железной дороги наблюдались многократные подключения преобразовательного агрегата через устройство синхронного включения тягового трансформатора. По результатам обработки этих экспериментов были построены дифференциальные (1) и интегральные (2) функции, на основе которых выполнен сравнительный анализ изменения кратности броска тока (рисунки 10,а и 11,а) и величины провала напряжения (рисунки 10,б и 11,б) при включении преобразовательного агрегата без УСВТ (по старой схеме) и с использованием УСВТ.

При использовании УСВТ наблюдается снижение среднего значения броска тока с 2,6 до  $1,1I_{ном}$ . Кроме этого в 90 % случаев включения величина броска тока не превышает  $2I_{ном}$ . Это приводит к снижению среднего значения величины провала напряжения с 16,9 % до 3,4 %, а также в 94 % случаев включения величина провала напряжения не превышает 10 %. Адекватность разработанной математической модели расчета бросков тока включения тягового трансформатора подтверждена совпадением результатов расчета, полученных на математической модели, с результатами экспериментальных исследований на действующей тяговой подстанции путем расчета критерия Смирнова для уровня значимости 10 %.

В результате разработанного способа и изготовленного на его основе устройства удалось

существенно повысить качество электрической энергии питания нетяговых потребителей путем снижения бросков тока в моменты подключения преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях.

## Список литературы

1. Сидоров, О. А. Влияние системы тягового электроснабжения на надежность электропитания устройств СЦБ и связи [Текст] / О. А. Сидоров, П. В. Тарута, М. А. Карабанов // Транспорт Урала. 2009. – № 4. – С. 95 – 97.
2. Тарута, П. В. Экспериментальная оценка величины провала напряжения при подключении резервного выпрямительного агрегата [Текст] / П. В. Тарута, М. А. Карабанов // Известия Транссиба. 2010. – № 2. – С. 76 – 80.
3. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
4. Лурье, А. И. Процесс включения трансформатора на холостой ход и короткое замыкание [Текст] / А. И. Лурье // Электротехника. 2008. – № 2. – С. 2 – 18.
5. Кузьменко, В. А. Снижение тока включения трансформаторов [Текст] / В. А. Кузьменко, А. И. Лурье и др. // Электротехника. 1997. – № 2. – С. 22 – 27.
6. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л. В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
7. Елагин, В. Н. Броски тока включения трансформаторов [Текст] / В. Н. Елагин, А. И. Лурье, А. Н. Панибратец // Электротехника. 1997. – № 2. – С. 29 – 32.
8. Евдокулин, Г. Трансформаторы в электрической сети моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы [Текст] / Г. Евдокулин, М. Дмитриев // Электротехника. 2008. – № 5. – С. 3 – 13.
9. Засыпкин, А. С. Релейная защита трансформаторов [Текст] / А. С. Засыпкин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
10. Черемисин, В. Т. Снижение провалов напряжения при коммутациях преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях [Текст] / В. Т. Черемисин, В. А. Кващук, М. А. Карабанов // Транспорт РФ. 2011. – № 3(34). – С. 36 – 39.

УДК 621.332.3:621.315.66

А. В. Протченко, В. А. Мухин

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ ЯЧЕЙКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОПОРЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

*В статье рассмотрена усовершенствованная схема замещения коррозионной ячейки железобетонной опоры контактной сети, предложены способ практического расчета описанных в теоретической электрохимии параметров коррозионной ячейки и система дифференциальных уравнений, описывающая электрохимические процессы в железобетонной опоре.*

Определение текущего коррозионного износа железобетонных опор – актуальная проблема для всех электрифицированных участков железных дорог Российской Федерации, что обуславливает серьезную заинтересованность данной темой как исследователей, так и эксплуатационных служб, занимающихся мониторингом опор контактной сети. В последние годы разработаны математические модели электрохимических процессов (например, предложенная в работе [1]), протекающих в опоре, но каждая из них имеет определенную степень

погрешности, в большей или меньшей степени отличающую расчетные величины от экспериментальных.

Основная особенность упомянутых выше моделей – линейность характеристик, что противоречит физическим представлениям о процессах, происходящих внутри исследуемого объекта. В данной статье предлагается нелинейная модель электрохимической системы опоры, позволяющая более точно учитывать свойства стали и границы раздела «металл – электролит».

Для построения схемы замещения коррозионной ячейки необходимо знать ее вольт-амперную характеристику (ВАХ), которая была получена в результате следующего эксперимента: на срезе арматуры с помощью специального устройства для электрохимических измерений [2] выделялась строго постоянная площадь поверхности. Потенциал этой площадки сдвигался от стационарного потенциала в водном растворе гидроксида кальция в положительном направлении со скоростью 5мВ/с с помощью потенциостата П-5848. На регистраторе КСП-4 при этом записывалось изменение тока до тех пор, пока ВАХ не становилась линейной, где исследуемая система могла быть описана уже известными линейными моделями. Образец помещался в раствор  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с  $\text{pH} = 13$ , что соответствует возможному значению  $\text{pH}$  в реальных железобетонных системах.

Результирующие кривые были усреднены и аппроксимированы полиномом Лагранжа 5-й степени, который показал расчетные значения функции, близкие к экспериментальным. Результат аппроксимации показан на рисунке 1. Коэффициенты результирующего полинома приведены в таблице 1. Полиномиальная аппроксимация была выбрана как наиболее подходящая для описания кривых подобной формы, ее рабочая анодная часть, используемая при дальнейших расчетах, представлена на рисунке 2. Она показывает, что линейная часть характеристики находится далеко за пределами коррозионной плотности тока, имеющей место в реальных опорах контактной сети.

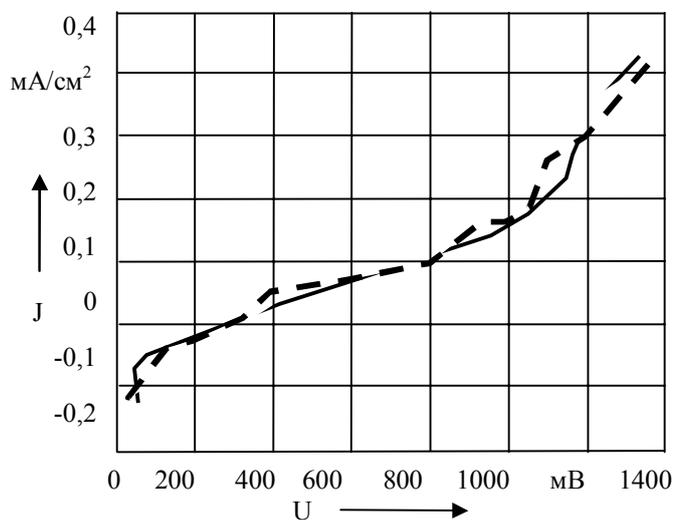


Рисунок 1 – Усредненная экспериментальная кривая ВАХ образца и ее полиномиальная аппроксимация:  
 ———— — экспериментальная кривая,  
 - - - - - — аппроксимированная кривая

Таблица 1 – Значение коэффициентов аппроксимирующего полинома

Обозначение коэффициента	Значение коэффициента
A0	702
A1	1283
A2	-5777
A3	15632
A4	-20121
A5	9759

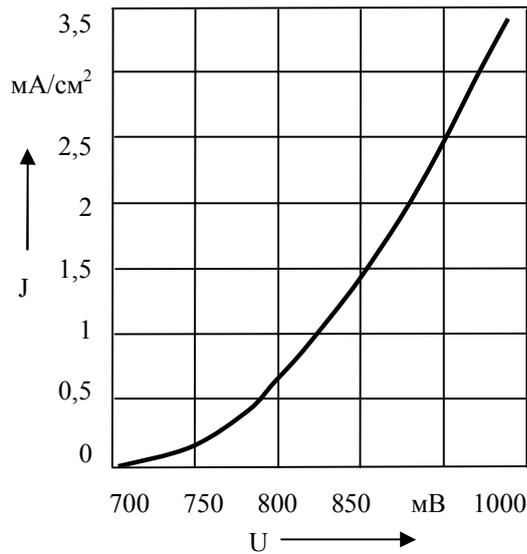


Рисунок 2 – Анодная часть экспериментальной ВАХ

Далее был проведен эксперимент по искусственному созданию коррозионных условий для образцов и снятию таких же ВАХ арматурной стали различной степени разрушения. В первом случае оксидная пленка была получена при выдерживании образца на воздухе и была чуть заметна. Каждый последующий опыт проводился с образцом большей степени коррозионного повреждения, полученным уже при помещении стали в водный раствор гидроксида кальция с подачей на нее постоянного тока, и на 4-м образце толщина слоя ржавчины сравнима с толщиной стали и составляет около 1,5 мм. На рисунках 3 – 6, представляющих результирующие кривые, видно, что с увеличением степени коррозии стационарный потенциал образца сдвигается в отрицательную сторону и форма характеристики становится более линейной за счет более раннего перехода кривой в линейную область. Это позволяет сделать вывод о существенном нелинейном влиянии нерастворимых продуктов коррозии на параметры электрической схемы замещения и о необходимости коррекции существующих линейных моделей для лучшего понимания и более точного моделирования электрохимических процессов внутри железобетонных сооружений вообще и опор контактной сети в частности.

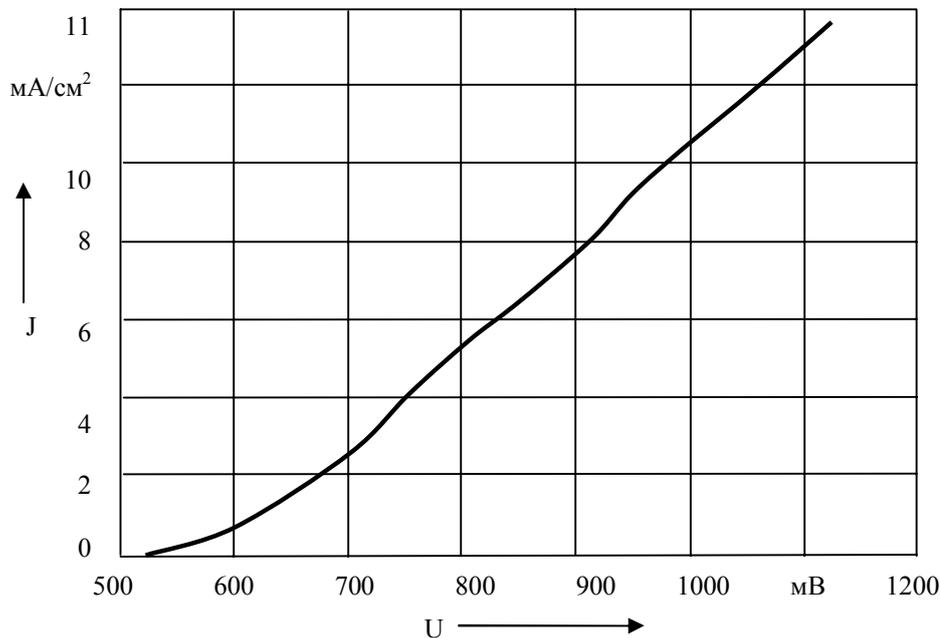


Рисунок 3 – Анодная часть ВАХ образца с наименьшими коррозионными повреждениями

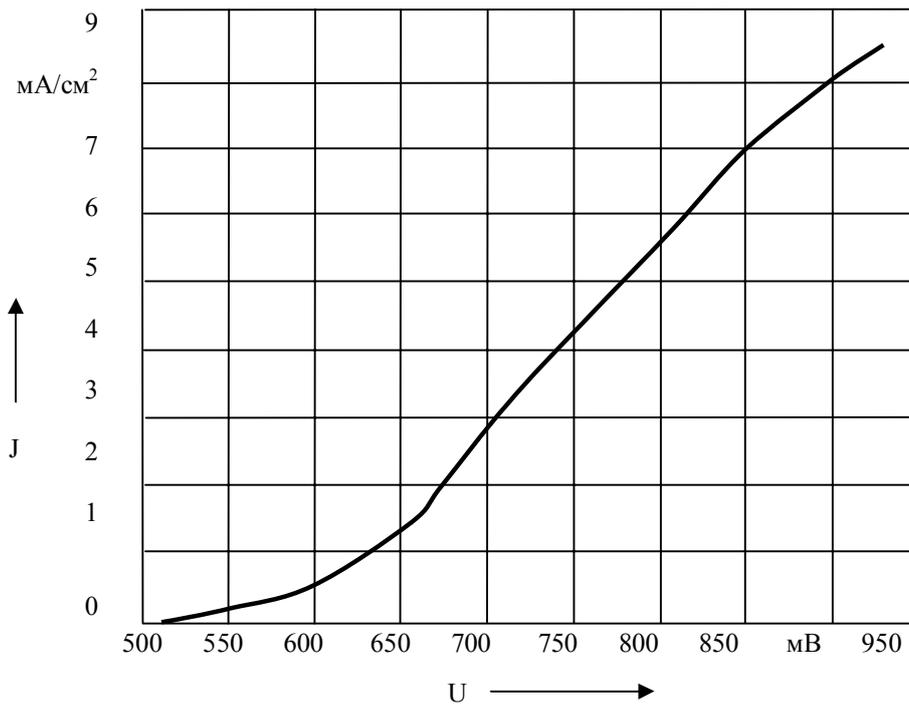


Рисунок 4 – Анодная часть ВАХ образца, покрытого равномерным очень тонким слоем ржавчины (толщина слоя продуктов коррозии – около 0,1 мм)

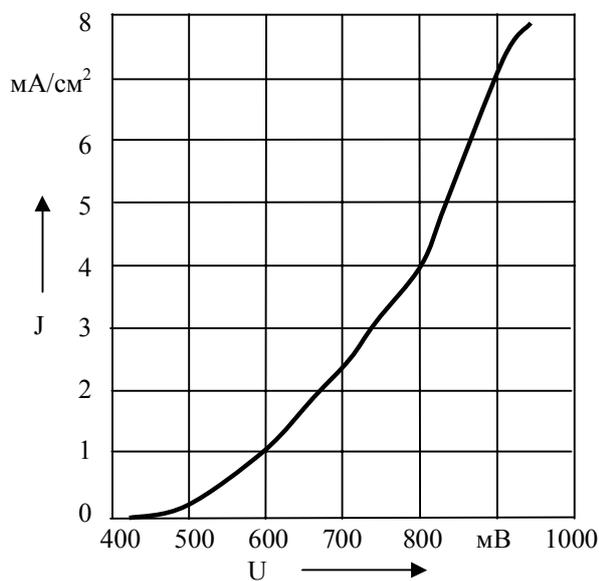


Рисунок 5 – Анодная часть ВАХ образца, покрытого равномерным тонким слоем ржавчины (толщина – меньше 0,5 мм)

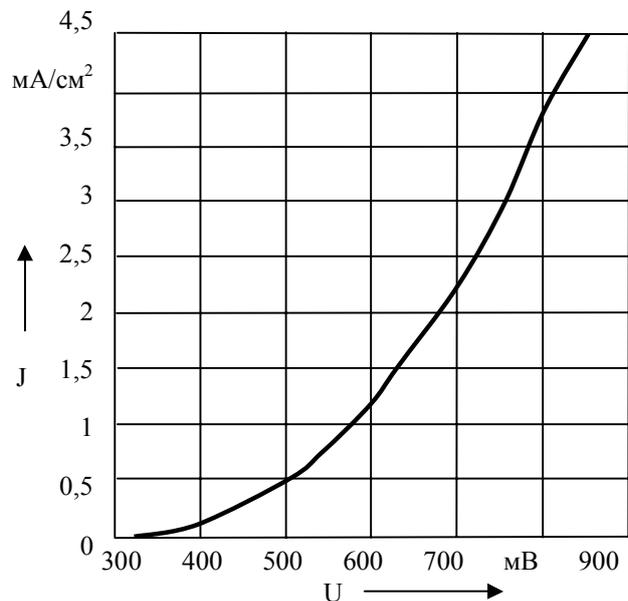


Рисунок 6 – Анодная часть ВАХ образца, покрытого пленкой ржавчины толщиной около 1,5 мм

Используемый в эксперименте образец является срезом арматурного прутка, поэтому геометрические параметры всего стержня будут пропорциональны параметрам образца, причем коэффициентом пропорциональности будет отношение площадей целой жилы и образца. Тогда параметры всей системы можно будет получить умножением результата на количество жил в опоре. Так как состав и свойства электролита в подземной части опоры одинаковы по всей длине, то разница электрохимических свойств границы раздела будет определяться только разницей в геометрических размерах систем. Тогда, согласно утверждению в работе [3], линейное преобразование системы координат для получения полинома, описывающего ВАХ подземной части опоры, можно получить линейно, рассчитав коэффициенты пропорциональности по току и напряжению, которые будут являться частным от деления математического ожидания токов и напряжений, полученных на реальной опоре, на математическое ожидание токов и напряжений, полученных на образцах.

Коэффициенты результирующего полинома приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты линейно преобразованного полинома, описывающего процессы в реальных опорах контактной сети

Обозначение коэффициента	Значение коэффициента
A0	0,078
A1	10,1
A2	-53,8
A3	146,0
A4	-182,0
A5	82,7

Известна схема замещения, предложенная в монографии [1] и показанная на рисунке 7. Здесь  $R_{гр}$ ,  $C_{гр}$  – сопротивление и емкость границы раздела сред «металл – электролит»,  $R_б$  – сопротивление бетона опоры, и  $U$  – собственный потенциал опоры. В работе [3] доказывается возможность ее применения для описания электрохимических процессов в железобетонных опорах.

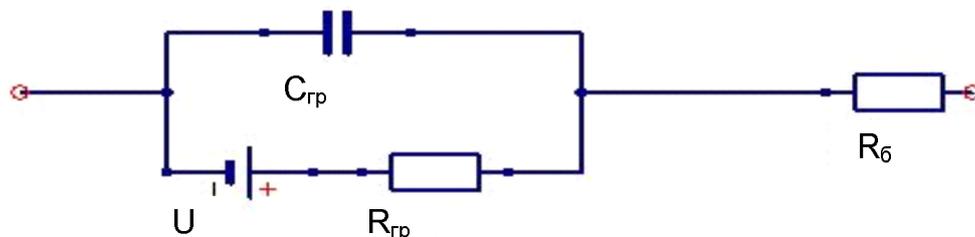


Рисунок 7 – Схема замещения границы раздела сред «арматура – бетон»

Поскольку в описанном выше эксперименте с образцами арматурной стали кривые снимались на постоянном токе, емкостная часть схемы не участвовала в формировании результатов эксперимента в силу своей физической природы. Результирующая схема с учетом этого условия показана на рисунке 8.

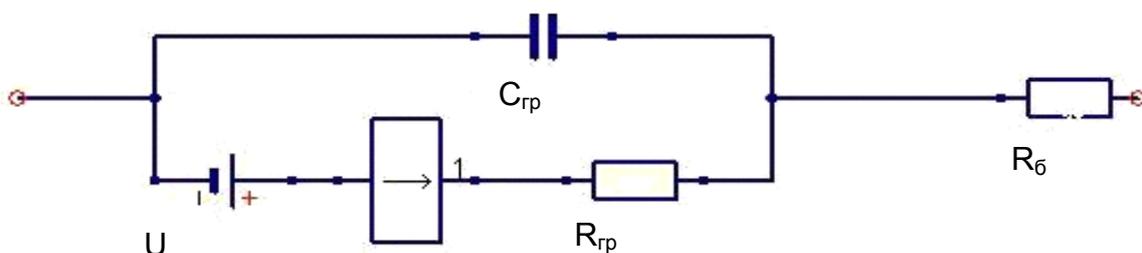


Рисунок 8 – Схема замещения с введением нелинейного элемента (1)

При использовании линейных параметров границы раздела результаты моделирования отличались от экспериментальных. Так, бетон – проводник II рода, его сопротивление линейно. Необходимо получить аналитические выражения линейной и нелинейной составляющей остальных элементов, которые могут быть определены в полевых условиях для возможности применения результатов данного исследования в реальном исследовании железобетонных опор службами ЭЧ.

В настоящее время разработано несколько теорий, позволяющих определить указанные выше величины [4]. Наиболее предпочтительной с учетом приведенных выше условий представляется теория Гельмгольца, рассматривающая в качестве емкости границы раздела модель плоского конденсатора. Данная теория в первом приближении дает результаты, близкие к экспериментальным. Кроме того, более совершенные теории Штерна и Грэма помимо плотного слоя учитывают и диффузионную составляющую, образуемую ионами, участвующими в тепловом движении, которую невозможно определить и рассчитать вне хорошо оборудованной химической лаборатории. Тогда величина емкости границы раздела может быть рассчитана методом, описанным в источнике [1].

Для определения сопротивления границы раздела воспользуемся результатами исследования стадии разряда-ионизации медленно текущей гетерогенной электрохимической реакции, приведенными в работе [4] и разработанными Б. Б. Дамаскиным и О. А. Петрием в продолжение работ А. Н. Фрумкина и М. А. Ворсиной. Согласно указанным результатам такое сопротивление может быть описано выражением:

$$R_{\text{гр}} = \frac{RT}{\alpha n F i} = \frac{b}{2,3i}, \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

$T$  – абсолютная температура, при которой проходит реакция окисления железа арматурной стали, К;

$\alpha$  – коэффициент переноса прямой реакции (окисление железа);

$n$  – количество электронов, участвовавших в анодном процессе реакции;

$F$  – константа Фарадея, Кл/моль;

$i$  – протекающий ток, А;

$b$  – коэффициент уравнения Тафеля.

Количество электронов  $n$  может быть определено из основной реакции, проходящей при коррозии стали:



Так как железо в реальных условиях щелочного раствора с высоким рН без доступа атмосферного воздуха не окисляется далее, в реакции будет участвовать не более двух электронов на каждый атом железа.

Температура реакции  $T$  будет меняться в зависимости от погодных, климатических условий и времени года, поэтому возможно использование среднегодовой температуры для данной местности, которая позволит оценить среднегодовую скорость электрохимических реакций в данных климатических условиях.

Обозначим в схеме, приведенной на рисунке 8, общий ток схемы как  $I_1$ , токи, протекающие через емкостную и нелинейную части схемы, –  $I_2$  и  $I_3$  соответственно, напряжение на нелинейном элементе –  $U_z$  и напряжение на емкости –  $U_c$ . Для исследования динамических свойств системы на схему подается также сигнал  $E$ , представляющий собой единичный скачок амплитудой 5 В для исследования поведения системы в переходном режиме, позволяющем вычислить параметры схемы. Тогда система уравнений, описывающих процессы в данной схеме, согласно законам Кирхгофа будет выглядеть следующим образом (нелинейная часть выделена в двух нижних уравнениях):

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 - I_2 - I_3 = 0; \\ U_C - I_3 R_{rp}(I_3) I_3 - U_Z(I_3) = -U; \\ U_Z(I_3) + I_3 R_{rp}(I_3) + I_1 R_6 = E; \\ I_2 = C_{rp} \frac{dU_C}{dt}; \\ R_{rp}(I_3) = \frac{b}{2,3I_3}; \\ U_Z(I_3) = 82,7I_3^5 - 182I_3^4 + 146I_3^3 - 53,8I_3^2 + 10,1I_3 + 0,078. \end{array} \right. \quad (3)$$

Данная система уравнений является нелинейной, поэтому не поддается решению аналитическими методами. Она была решена численными методами на языке Python [5]. Результат решения показан на рисунке 9. Он полностью совпадает с экспериментальными кривыми напряжения и тока, полученными в переходном режиме при подаче на арматуру реальной железобетонной опоры контактной сети единичного скачка напряжения. Это доказывает состоятельность системы и ее применимость для описания электрохимических процессов в железобетонной опоре, особенно когда линейные модели вносят существенную погрешность.

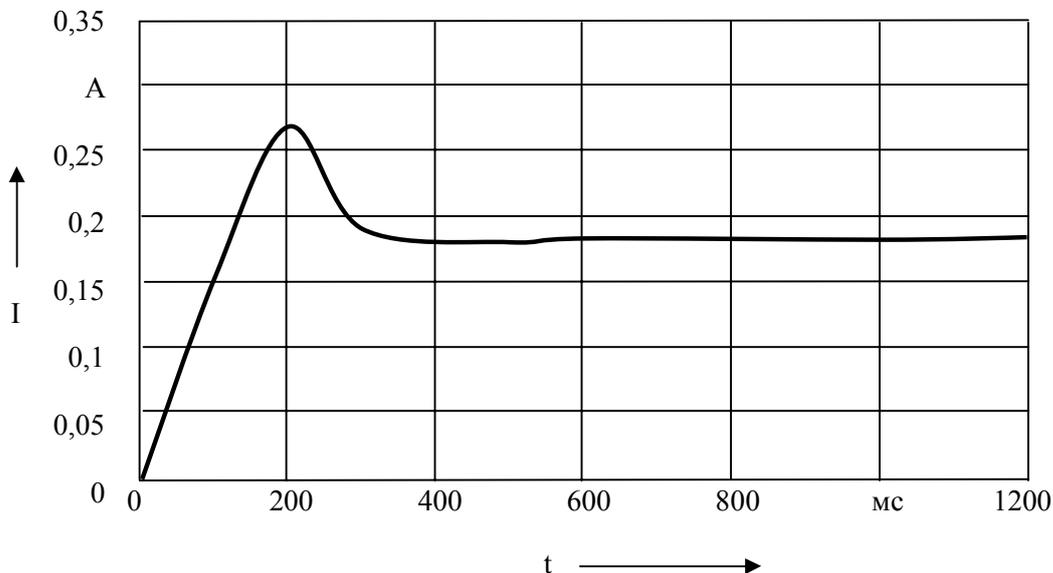


Рисунок 9 – Кривая выходного тока, полученная на выходе нелинейной модели

### Список литературы

1. Кандаев, В. А. Совершенствование эксплуатационного контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст]: Монография / В. А. Кандаев / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2003. – 198 с.
2. Пат. 2348030 Российская Федерация. МПК G 01N27/26. Устройство для электрохимических измерений [Текст] / Т. В. Яцкевич, В. Ф. Борбат, В. А. Мухин (Россия). – 2007127404/28; Заявлено 17.07.2007; Опубл. 27.02.2009. Бюл. №6. – 10 с.
3. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
4. Дамаскин, Б. Б. Введение в электрохимическую кинетику [Текст] / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий. – М.: Высшая школа, 1975. – 416 с.
5. Landtangen, Н. А Primer on Scientific Programming with Python [Текст] / Н. Р. Landtangen // Springer. – Берлин, 2009. – 726 с.

Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*В статье рассмотрены основные элементы анализа эффективности применения рекуперативного торможения при проведении энергетического обследования объектов железнодорожного транспорта.*

Полное энергетическое обследование железной дороги невозможно без учета специфики отрасли, где до 80 % потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) приходится на тягу поездов. Однако в настоящее время никаких официальных рекомендаций по решению этой проблемы не существует. С целью объективной оценки тягового энергопотребления и выработки мероприятий по повышению энергетической эффективности перевозочного процесса специалистами кафедры «Прикладная математика и механика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) предложены методика энергетического обследования тяги поездов, состав и структура специальных таблиц статистического анализа энергозатрат на тягу поездов (САЭТ) для эксплуатационного локомотивного депо (САЭТ-ТЧ), региональной дирекции тяги (САЭТ-Н) и центральной дирекции тяги ОАО «Российские железные дороги» (САЭТ-Ц), а также порядок их заполнения. Базой для формирования этих документов являются данные соответствующих аналогичных таблиц нижестоящих структурных подразделений и информация автоматизированной системы интегрированной обработки маршрута машиниста (ИОММ), содержащей генеральную совокупность данных о результатах поездок локомотивных бригад. Схема информационных потоков процесса формирования комплекса аналитических таблиц об энергопотреблении на тягу поездов на различных организационных уровнях железнодорожной отрасли приведена на рисунке 1.

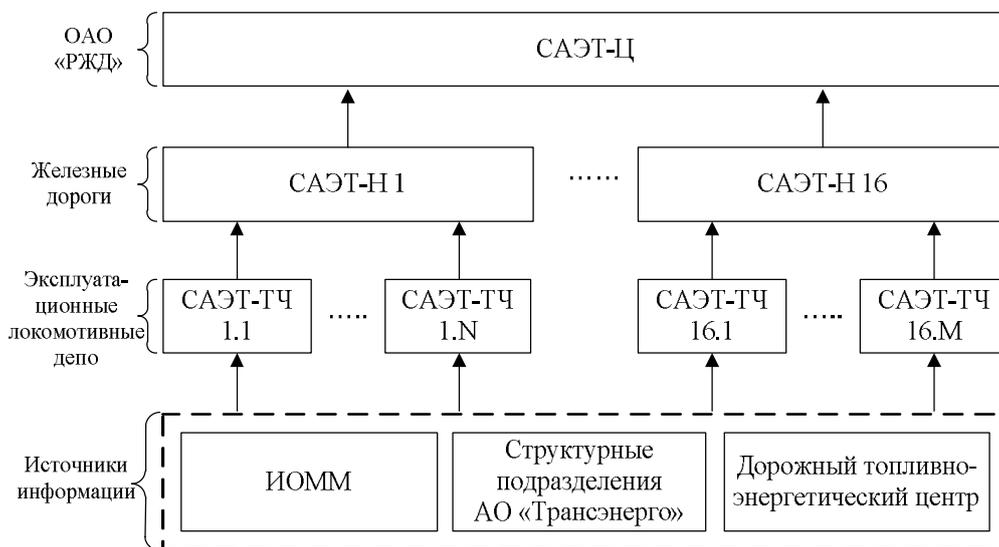


Рисунок 1 – Схема информационных потоков формирования аналитических таблиц САЭТ

В соответствии с методологией системного подхода объект исследования – энергозатраты на тягу поездов – целесообразно систематизировать по различным группам и признакам, позволяющим упростить их рассмотрение с учетом влияния на них основных эксплуатационных факторов. Таблицы САЭТ следует объединить в группы в соответствии с функциональным назначением входящих в них показателей, например, на уровне региональной ди-

рекции тяги рекомендовано выделить следующие комплекты таблиц:

ретроспективные ряды фактических показателей работы и энергопотребления эксплуатационных локомотивных депо железной дороги за пять лет. Эти данные служат основой для проведения анализа выполнения программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности, выработанной при предыдущем энергообследовании, а также определения тенденций изменения основных показателей потребления ТЭР на тягу поездов;

сведения о работе локомотивов и топливно-энергетический баланс по видам тягового подвижного состава (ТПС) и структурным подразделениям железной дороги;

детализированные данные о расходе электрической энергии на тягу поездов и влияющих на него факторах на различных уровнях нормирования.

Выполненный анализ составляющих энергозатрат на тягу поездов в локомотивных депо Западно-Сибирской, Куйбышевской и Свердловской железных дорог за 2007 – 2010 гг. позволил выявить основные закономерности их изменения, определить влияющие на них эксплуатационные факторы и установить внутренние взаимосвязи между таблицами САЭТ, схема которых приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема внутренних взаимосвязей таблиц САЭТ

Важнейшим резервом повышения безопасности движения и энергоэффективности электрической тяги поездов является применение рекуперативного торможения, которое затрагивает интересы многих служб: движения, электроснабжения, локомотивной, пути, вагонного хозяйства, автоматики и телемеханики, связи. Однако анализ, проведенный специалистами Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТа), Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) и Восточно-Сибирской железной дороги в 2005 – 2007 гг., показал, что существует ряд причин субъективного и объективного характера, тормозящих применение рекуперации [1]. Это связано с тем, что различные подразделения дорог имеют не только положительные (снижение удельного расхода электроэнергии на тягу, увеличение пропускной способности участков железных дорог, повышение технической скорости, экономия тормозных колодок и др.), но и отрицательные (увеличение уровня помех на устройствах автоматической локомотивной сигнализации и в рельсовых цепях, увеличение интенсивности бокового износа рельсов и др.) результаты работы в этой сфере деятельности. Несмотря на это комплексная оценка общего технико-экономического эффекта от использования электрического торможения позволяет сделать вывод о его целесообразности. Поэтому в специальных таблицах САЭТ преду-

смотрено отражение показателей эффективности применения рекуперации в структурных подразделениях железной дороги за пять лет, предшествующих проведению энергетического обследования. Базовый вариант такой таблицы для региональной дирекции тяги приведен в таблице 1.

При анализе данных об эффективности применения рекуперации особое внимание следует уделять не только абсолютным значениям удельного возврата электроэнергии в контактную сеть, но и доле возвращаемой энергии относительно ее расхода на тягу поездов. Так, данные, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о том, что 11,7 % работы всей железной дороги выполняется в ТЧ-1 локомотивами серии ВЛ10, однако эффективность возврата электроэнергии при этом низка. Такие результаты можно объяснить несколькими причинами, подлежащими подтверждению или опровержению при дальнейшем углубленном анализе:

- машинисты не обладают навыками применения режима рекуперативного торможения;
- неисправна схема рекуперации на значительной доле электровозов локомотивного депо;
- неверно настроены инверторные установки на тяговых подстанциях;
- профиль и план пути обслуживаемых поездоучастков не позволяют применять рекуперативное торможение.

Таблица 1 – Эффективность применения рекуперативного торможения

Год	Серия локомотива	Локомотивное депо	Удельный вес работы серии локомотива в депо в работе в целом по железной дороге, %	Удельный вес возврата электроэнергии по серии локомотива в депо в возврате в целом по железной дороге, %	Доля возвращаемой энергии от расхода на тягу поездов, %	Удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении, $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{10^4 \text{ ткм бр.}}$	Отношение удельного возврата энергии по серии локомотива в депо к удельному возврату в целом по железной дороге		
2010	ВЛ10	ТЧ-1	11,7	6,8	3,7	2,9	1,526		
		ТЧ-2	9,4	11,2	7,4	9,3	4,895		
		ТЧ-N	14,8	3,8	1,1	1,6	0,842		
		Всего	37,2	41,6	3,2	2,6	1,368		
	ВЛ80Р	ТЧ-2	1,5	10,2	5,2	6,6	3,474		
		ТЧ-4	2,6	1,9	0,8	1,3	0,684		
		ТЧ-N	0,9	5,2	2,7	1,8	0,947		
		Всего	4,7	19,8	3,5	3,8	2,000		
		Всего по дороге в 2010 г.			100	100,0	2,4	1,9	1,000

Результаты детального исследования по приведенным выше направлениям являются основой для разработки организационных и технических мероприятий по устранению выявленных негативных фактов.

Для оценки эффективности рекуперативного торможения в структурных подразделениях железной дороги целесообразно проведение комплексного эксперимента, схема которого приведена на рисунке 3. Такие исследования были выполнены специалистами ОмГУПС на Свердловской железной дороге [3]. При этом на одном из поездоучастков был выявлен резерв снижения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов до 20 % только за счет применения рекуперации.

Одним из важных этапов энергетического обследования является сравнительный анализ эффективности применения рекуперативного торможения локомотивными бригадами на подвижном составе разных структурных подразделений железной дороги с расчетом наиболее значимых статистических характеристик. Фрагмент аналитической таблицы результатов работы разных локомотивных депо на общем поездоучастке А – Б приведен в таблице 2, данные которой свидетельствуют о необходимости проведения обследования исправности и качества настройки систем рекуперации на электровозах ТЧ-2.

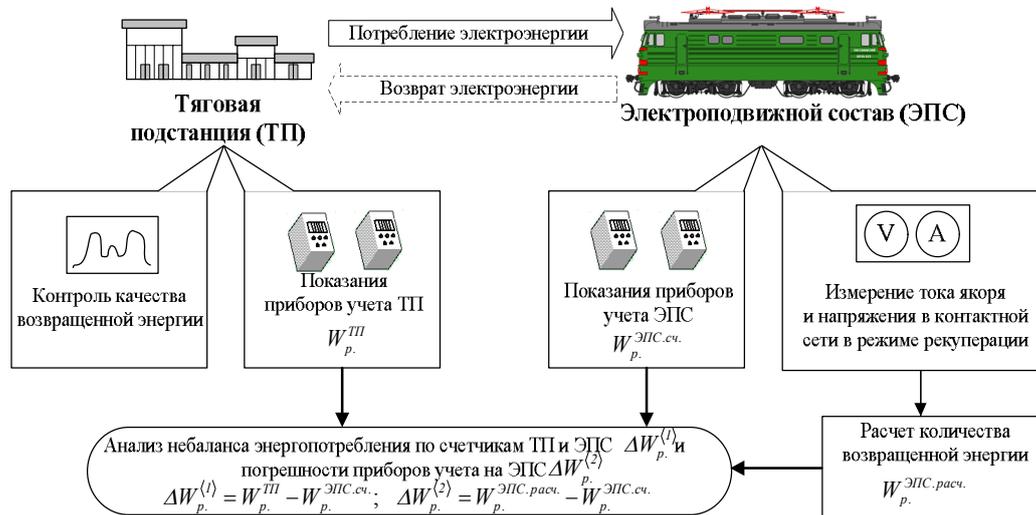


Рисунок 3 – Схема проведения экспериментальных исследований по оценке эффективности рекуперации

Графическая схема алгоритма проведения такого анализа для показателя удельного возврата электроэнергии при рекуперативном торможении приведена на рисунке 4, где приняты следующие обозначения:  $R$  – количество электрической энергии, возвращенной в контактную сеть при рекуперативном торможении, кВт·ч;  $(QL)$  – тонно-километровая работа,  $10^4$  ткм брутто;  $\sigma_r$  – среднее квадратическое отклонение величин удельной рекуперации  $r_i$  относительно их математического ожидания  $\langle r \rangle$  [2]. Аналогичное исследование проводится для определения доли возврата электроэнергии в контактную сеть относительно расхода на тягу.

Таблица 2 – Сравнительный анализ эффективности применения рекуперативного торможения

Серия локомотива	Поездоучасток	Локомотивное депо	Доля работы на участке от работы по депо, %	Доля работы на участке от работы в целом по дороге, %	Средняя масса грузовых поездов, т	Возврат электроэнергии при рекуперативном торможении, кВт·ч	Доля возврата на участке от расхода на тягу поездов, %	Удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении, $\frac{\text{кВт·ч}}{10^4 \text{ ткм бр.}}$
ВЛ10	А – Б	ТЧ-1	9,2	1,7	2886	687200	3,4	5,4
		ТЧ-2	42,8	14,3	3152	3874600	2,5	4,3
		ТЧ-3	21,3	7,6	3350	1468100	3,1	4,7
		Все-го	–	11,5	3211	6029900	3,1	4,5
<i>Статистические характеристики</i>								
Математическое ожидание					3096	3014950	3,0	4,8
Среднее квадратическое отклонение					286	2424877	0,4	0,6
Нижняя граница доверительного интервала					2810	590072	2,6	4,2
Верхняя граница доверительного интервала					3382	5439827	3,4	5,4

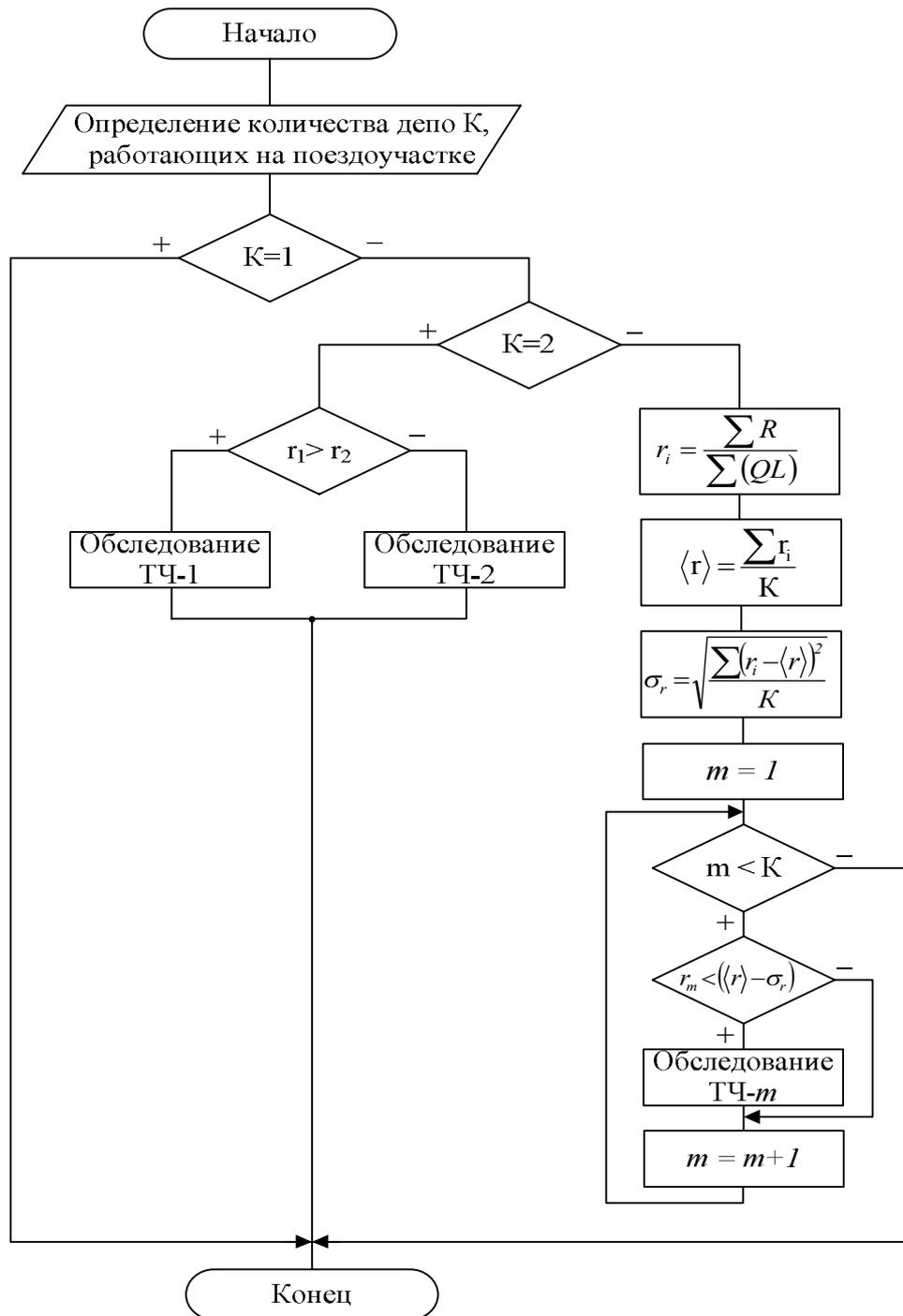


Рисунок 4 – Графическая схема алгоритма сравнительного анализа эффективности рекуперации на накладных участках работы локомотивных бригад

Рассмотренные особенности анализа применения рекуперативного торможения были реализованы при проведении энергетического обследования трех локомотивных депо на двух железных дорогах России в 2008 – 2010 гг. На основе полученного опыта можно утверждать, что потенциал снижения удельного расхода электрической энергии за счет повышения эффективности рекуперации составляет 1 – 3 %.

1. Рекуперация повышает энергетическую эффективность дорог [Текст] / В. Котельников, А. Я. Коган и др. // Локомотив. 2008. – № 4. – С. 20 – 22.
2. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник [Текст] / А. А. Белов, Б. А. Баллод и др. – М.: Феникс, 2008. – 318 с.
3. Вильгельм, А. С. Баланс электроэнергии в режимах тяги и рекуперации [Текст] // А. С. Вильгельм, А. Н. Ларин, А. И. Давыдов // Локомотив. 2011. – № 5. С 36 – 38.

УДК 658.567.1

М. С. Шерстобитов, В. М. Лебедев

### СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

*Статья посвящена рассмотрению проблемы утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) в городах с большой плотностью населения и анализу существующих путей решения данной проблемы. К основным способам утилизации ТБО относятся складирование отходов на полигонах, комплексная сортировка с переработкой выделенных компонентов, биотермическое компостирование, мусоросжигание. Из перечисленных вариантов обезвреживания ТБО особое внимание уделено сжиганию отходов на колосниковой решетке с наклонно-переталкивающим механизмом.*

Твердые бытовые отходы – это бытовой мусор, который за ненадобностью выбрасывается населением городов и поселков городского типа из жилых и общественных зданий. Сюда же можно отнести мусор сооружений непроизводственного назначения, а также смет улиц и отходы садово-парковых хозяйств (листья, трава, ветки деревьев и т. п.).

На городских свалках даже среднего города ежегодно скапливаются сотни тысяч тонн бытовых отходов. Разлагаясь, они отравляют воздух, почву, подземные воды и превращаются, таким образом, в серьезную опасность для окружающей среды и человека.

Во всем мире переработка и утилизация бытовых отходов становятся все более актуальной проблемой. Известно, что ежегодно в нашей стране скапливается порядка 190 млн м<sup>3</sup> твердых бытовых отходов. Это количество ТБО с каждым годом увеличивается, и их ликвидация и обезвреживание в настоящее время становятся сложной экологической, технической и экономической проблемой городского коммунального хозяйства. Особенно остро стоит эта проблема в городах с большой плотностью населения [4].

В периодической печати появилось достаточно много статей в части утилизации ТБО, однако единой определяющей точки зрения в использовании ТБО до сих пор нет, что в значительной степени продолжает наносить вред окружающей среде.

В настоящее время известны следующие способы утилизации ТБО:

- 1) складирование отходов на полигонах;
- 2) комплексная сортировка с утилизацией выделенных компонентов;
- 3) биотермическое компостирование;
- 4) мусоросжигание.

Цель всех этих способов едина – обезвредить твердые бытовые отходы, максимально утилизировать продукты обезвреживания, ликвидировать существующие и не допускать образование новых свалок бытовых отходов, не допускать, чтобы вторичные продукты обезвреживания отходов наносили какой-либо вред окружающей среде.

Рассмотрим известные способы утилизации ТБО.

*Складирование отходов на полигонах.* Складирование предполагает следующие основные условия:

наличие участка с основанием на водоупорных грунтах;

расположение уровня грунтовых вод ниже трех метров от поверхности земли (при этом участки с выходами ключей исключаются);

обеспечение грунтом или инертными отходами для изоляции бытовых отходов (путем их перемешивания);

наличие механизированных устройств для выполнения работ на полигоне.

Однако перечисленные условия, как правило, отсутствуют, поэтому полигон превращается в обычную городскую свалку бытового мусора, которая не является по указанным выше условиям способом обезвреживания отходов. Кроме того, полигон имеет такую отрицательную сторону: в городах с миллионным населением, например в Омске, на свалки в течение года поступает более 400 тыс. т твердых бытовых отходов. Если принять среднюю высоту складирования мусора в 10 м, то ежегодная потребная территория под свалки составит порядка 20 га [3].

За рубежом свалкам и полигонам не придают серьезного значения, так как рассматривают их как временные мероприятия до строительства промпредприятия по их переработке. Так, например, в Японии свалки и полигоны ликвидированы. Весь бытовой мусор обезвреживается и утилизируется на специализированных предприятиях. В России твердый бытовой мусор преимущественно складировается на загородных свалках.

*Комплексная сортировка.* Основная цель комплексной сортировки – извлечение из всей массы собранных ТБО утильных компонентов – металла (черного и цветного), бумаги, пластмассы, стекла, пищевых и горючих отходов, текстиля. После извлечения указанных компонентов предполагается их использование в различных отраслях хозяйства в качестве вторичного сырья.

В отличие от бытовых промышленные отходы могут сравнительно легко подвергаться сортировке на различные компоненты, так как каждый из их видов имеет довольно однородную структуру (например, отходы механической обработки, типографские отходы, обрезки кожи и меха в легкой промышленности, крупнофракционные отходы в деревообрабатывающей промышленности и т. д.). Кроме того, они не загрязнены, влажность их небольшая, что позволяет применить соответствующую механизированную линию сортировки. Поэтому целесообразность устройства сортировки промышленных отходов очевидна.

С бытовыми отходами дело обстоит иначе. Как известно, состав бытовых отходов весьма разнороден. В нем, например, находятся различные мелкофракционные и загрязненные тяжелые и цветные металлы, кости, которые, с одной стороны, представляют интерес как вторсырье, а с другой стороны, извлечь их какими-либо механическими устройствами чрезвычайно сложно, так как они находятся рассеянно в общей массе мусора. Не полностью открытые консервные банки, бумага, текстиль, мелкая пластмасса, которые погребены в толще грязного и весьма влажного мусора, не могут быть полностью извлечены.

Так как ценные компоненты бытового мусора могут быть использованы на предприятиях разных отраслей промышленности как вторичные сырьевые ресурсы, имеется мнение, что их можно получить двумя путями:

1) сортировать мусор в месте сбора, т. е. в каждой квартире, и складировать его в разных емкостях (контейнерах), в этом случае должен быть исключен для использования общий (единый) мусоропровод в домах, где он имеется;

2) сортировать всю массу бытового мусора, перемешанного в мусоропроводах или в общих контейнерах, централизованно на специальных предприятиях, предназначенных для какой-либо переработки мусора, с помощью различных механизированных линий и устройств.

Сторонниками сортировки ТБО в местах сбора, т. е. по первому пути, утверждается, что если каждый житель будет предварительно сортировать все свои бытовые отходы по их компонентам, то количество вторично используемых отходов может составить примерно 35 %.

Даже в ФРГ, где данной проблемой занимаются десятилетиями, этот показатель не достигнут – остальные 65 % должны вывозиться на свалку.

Анализ состава бытовых отходов и опыт, накопленный за рубежом, показывает, что подобный метод не может разрешить проблему обработки всего бытового мусора в городах с целью извлечения различных компонентов для вторичного использования. Такая сортировка может охватить только 5 – 10 % (максимально) от общего количества бытовых отходов.

Что касается механизированной сортировки бытового мусора (по указанному выше второму пути), то в Москве на заводе «Полимер» (в Нагатино) была сооружена такая экспериментальная установка, которая из-за своей ненадежности в условиях повышенной влажности отходов, из-за низкой эффективности извлечения компонентов и существенных трудностей в эксплуатации после длительных экспериментов была демонтирована.

*Биотермическое компостирование.* Конечным продуктом биотермической мусоропереработки является компост (органическое удобрение). Компостированию подлежит 67 % общей массы бытовых отходов. Некомпостируемая часть (33 %) должна вывозиться на свалку (что и осуществляется до настоящего времени), или для нее должен применяться один из других способов обезвреживания (что в целом делает компостирование весьма дорогим мероприятием).

Процесс компостирования происходит, как правило, в биотермическом барабане, при котором в качестве энергетического материала используются аэробные микроорганизмы, способствующие окислению и разложению органической массы бытовых отходов.

В зависимости от состава отходов в результате технологического процесса выделяются следующие вредные вещества: пыль органического и минерального происхождения, окись углерода, толуол, ксилол, углеводороды, бензол, ацетон и др. Кроме того, исследования Института минералогии, геохимии и кристаллографии редких элементов (ИМГРЭ) показали, что компост, приготовленный из бытового мусора, значительно превосходит почвы по содержанию таких токсичных элементов, как сурьма, ртуть, кадмий, висмут, медь, свинец, серебро, олово, вольфрам, молибден, хром. Применение такого компоста приводит к существенному накоплению этих элементов в почве и сельхозпродуктах.

Институт питания Академии медицинских наук выполнил многочисленные анализы проб растительной продукции на содержание тяжелых металлов, выращенной на полях трех подмосковных совхозов: «Сергиевский» (Коломенский район), имени Моссовета (Люберецкий), «Серп и Молот» (Балашихинский). Результаты анализов привели к следующему заключению института питания: «По результатам испытания можно констатировать следующие превышения нормативных уровней ПДК: содержание кадмия в моркови совхоза им. Моссовета и совхоза «Серп и Молот» превышает ПДК в 3 – 6 раз, а в свекле, выращенной в этих совхозах, – в 10 – 14 раз. В тех же образцах свеклы в 2 – 3 раза превышена предельно допустимая концентрация цинка».

Реакция санэпидемстанции на указанные результаты исследования была однозначной: такие продукты в пищу употреблять нельзя. По этой и другим причинам, связанным с трудностями реализации своей продукции, московский мусороперерабатывающий завод был закрыт и перепрофилирован.

Мусороперерабатывающий завод не решает основную экологическую проблему – защиту окружающей среды от загрязнений, содержащихся в мусоре. Практически мусор со всеми содержащимися в нем примесями тяжелых металлов, радиоактивных веществ и других возможных вредных веществ превращается в форму, удобную для внесения на поля в качестве удобрения или в теплицы в качестве биотоплива.

Вредные примеси переходят в состав растительной пищи со всеми вытекающими последствиями, попадают в грунтовые воды и, соответственно, в питьевую воду.

И все же необходимо сказать о том, что биотермическое компостирование могло бы найти применение для сельской местности, где имеется значительное количество сельскохозяйственных отходов, не содержащих тяжелые металлы и другие вредные, в том числе радиоактивные, компоненты, а продукцию такого компостирования можно использовать для выра-

щивания цветов. Использовать городские твердые бытовые отходы для компостирования и внесения в почву такого удобрения для производства растительной пищевой продукции противопоказано.

*Мусоросжигание.* Цель мусоросжигания – полностью обезвредить твердые бытовые отходы, а следовательно, ликвидировать имеющиеся городские свалки и не допустить образование новых. Поэтому предприятия, на которых производится такое обезвреживание (такие предприятия называются заводами по термической переработке твердых бытовых отходов), являются природоохранными.

Сжигание бытового мусора производится в топочных устройствах специальных котлоагрегатов, конструкция которых учитывает специфические свойства мусора – высокую влажность (до 65 %), широкое разнообразие компонентов, включая черные, цветные и тяжелые металлы, строительный материал, битое стекло, пластмассу, вязкие и гниющие вещества и др. В случае необходимости указанные топочные устройства допускают совместное сжигание твердых бытовых отходов и твердых горючих остатков сточных вод после очистки сооружений или твердых горючих нетоксичных промышленных отходов.

Учитывая переменное качество бытовых отходов по сезонам года (так, влажность достигает 60 – 65 %, а зольность – до 21 – 23 %), из-за чего теплота сгорания колеблется от 800 до 1700 ккал/кг, для стабилизации процесса и создания необходимых температурных условий, при которых содержание вредных веществ в отходящих дымовых газах минимально, совместно с бытовыми отходами в одном и том же топочном устройстве сжигают природный газ или мазут. Годовой расход дополнительного (ископаемого) топлива составляет 4 – 6 % от годового количества сжигаемого бытового мусора.

Образуемое от сжигания отходов тепло расходуется частично на собственные нужды завода, а остальное – на внешнее потребление (при необходимости) либо в виде пара (насыщенного или перегретого) с давлением до 1,4 МПа, либо в виде горячей воды с температурой до 150°C или на выработку электроэнергии в паротурбинной установке, потребляемой на собственные нужды завода. При необходимости возможна выработка электроэнергии не только для собственных нужд, но и для внешних потребителей при соответствующем расходе дополнительного (ископаемого) топлива. Однако даже в этом случае себестоимость выработанной электроэнергии будет ниже себестоимости электроэнергии, вырабатываемой на городских электростанциях при сжигании только ископаемого топлива.

Остающиеся после сжигания бытовых отходов шлаки, зола используются для изготовления по специально разработанному технологическому процессу облицовочной стеклоплитки и гранулированного шлака, идущего затем для приготовления керамзита или для других строительных нужд.

Металлы, находящиеся в составе шлака и золы в количестве 25 кг на одну тонну ТБО и остающиеся на дне шлаковой ванны, выпускаются в жидком состоянии в специальные формы для образования слитков, которые сдаются по определенной цене предприятиям Вторчермета.

Сжигание бытовых отходов происходит при температурных условиях ( $\geq 850$  С), необходимых для минимального образования вредных веществ, концентрация которых в приземном слое значительно меньше предельнодопустимых концентраций.

Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова, НИИОГАЗ, Энергоэкология, Укркоммунмонтажнадка, Институт газа АН Российской Федерации своими исследованиями многочисленных проб отходящих газов на действующих мусоросжигательных заводах определили, что фактические максимальные концентрации вредных веществ (летучая зола, окислы азота, серы и углерода, хлористый и фтористый водород) в приземном слое воздуха в десятки раз меньше предельно допустимых концентраций (ПДК). Так, поскольку процесс сжигания отходов проводится при сравнительно низкой температуре (850 – 1000 °С), образование окислов азота происходит в значительно меньших количествах, чем на ТЭЦ или в котельных при сжигании только ископаемого топлива, которое сгорает при температуре 1350 –

1550°C. Низкое содержание серы в ТБО (0,2 – 0,3 %) ведет к образованию незначительного количества SO<sub>2</sub> [5].

Несколько подробнее нужно сказать об особо опасных веществах, таких как диоксин и фуран, которые могут выделяться при сжигании бытовых отходов.

Эти вещества действительно могут образовываться при неполном сгорании топлива, в составе которого содержатся хлор, фтор и органические компоненты. Так, например, доказано присутствие диоксина в сигаретном дыме и пепле.

Установлено, что если после сжигания бытовых отходов дымовые газы будут находиться в течение более двух секунд под воздействием температуры не ниже 850 °С, то диоксины и фураны практически не образуются, так как сложные хлор-, фторсодержащие и углеводородные соединения, служащие их основой, разлагаются на нейтральные вещества [1].

Несколько слов о тяжелых металлах, находящихся в составе бытового мусора. Исследованиями установлено, что из 25 кг металла на тонну твердых бытовых отходов 11,26 кг – тяжелые металлы (мышьяк, свинец, кадмий, хром, медь, марганец, никель, ртуть, цинк, олово и др.), которые являются вредными для человека. В результате сжигания бытовых отходов они в парообразном состоянии переходят в состав дымовых газов, где конденсируются на поверхностях зольных частиц и пыли. После очистки дымовых газов в электрофильтре или рукавном фильтре в них остается не более 2,5 г (в расчете на одну тонну бытовых отходов). Следовательно, в атмосферу будет выброшено только 0,022 % от первоначального количества тяжелых металлов [2].

Таким образом, при мусоросжигании, в котором твердые бытовые отходы не только полностью обезвреживаются, но и являются возобновляемым и неисчерпаемым топливом, получаемые тепло, электроэнергия, металлы, облицовочная плитка, гранулированный шлак являются продуктами утилизации твердых бытовых отходов.

Следовательно, процесс мусоросжигания как способ обезвреживания бытового мусора безотходный и он своими вторичными продуктами не загрязняет окружающую среду, так как выбросы вредных веществ, образуемые при мусоросжигании, ничтожно малы и не причиняют никакого вреда живой природе.

Из всех рассмотренных способов обезвреживания твердых бытовых отходов наиболее рациональным, экологически «чистым» и радикальным с точки зрения достижения основной цели в решении проблемы – обезвреживание, утилизация выработанной продукции, ликвидация свалок, предотвращение загрязнения окружающей среды – является мусоросжигание в топочных устройствах специальных мусоросжигательных котлоагрегатов. Этот способ повсеместно применяется в странах мира.

Для большинства промышленных городов России – Челябинска, Екатеринбурга, Омска и многих других – очень важно, чтобы строительство мусоросжигательного завода было под силу городскому бюджету. Чтобы снизить капитальные затраты, нужно оснастить завод отечественным оборудованием, но не менее важно выбрать рациональную технологическую схему, которая позволила бы совместить работу завода с ТЭЦ или котельной и тем самым повысить экономичность переработки отходов. Специалисты подсчитали, что для городов с населением 500 – 600 тыс. человек оптимальным будет завод производительностью 120 – 150 тыс. т бытовых отходов в год, а наиболее экономичным способом использования энергии – отпуск тепла. С учетом этого во Всероссийском теплотехническом институте сейчас разрабатывается отечественная технология сжигания твердых бытовых отходов, созданная под оборудование российского производства.

Примером может служить строящийся мусоросжигательный завод в Тракторозаводском районе Челябинска, который будет работать в единой системе с городской ТЭЦ-2. Его технологическая схема достаточно проста: вода с ТЭЦ поступает на завод, где в котлоагрегатах вырабатывается пар. Оттуда одна его часть через общий коллектор с ТЭЦ подается потребителям, другая – на технологические нужды мусоросжигательного завода. Себестоимость переработки отходов в этом случае значительно ниже, чем при автономной схеме [6].

Отходы поступают на переработку без какой-либо предварительной подготовки. Подъехавшие мусоровозы проходят через автовесовую и сразу направляются по эстакаде в приемное отделение на разгрузку. Приемный бункер, рассчитанный на трехсуточный запас отходов, обслуживается двумя мостовыми грейферными кранами грузоподъемностью по 10 т. С помощью многочелюстных захватов-грейферов ТБО перемешиваются и из них удаляются крупногабаритные предметы. Затем отходы попадают в топку мусоросжигательного котла. Для его растопки и стабилизации горения влажных отходов используются четыре газовые горелки. Одновременно с отходами в топку подают негашеную известь-пыленку, которая связывает вредные примеси ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  и  $\text{SO}_2$ ) в дымовых газах. На подвижной решетке начинается процесс подсушивания отходов горячим воздухом и потоком тепла из топки. Продвигаясь дальше, отходы воспламеняются и интенсивно горят. Вращающиеся валки под колосниковой решеткой помогают интенсивной шуровке (ворошению) отходов и одновременно перемещают их из одной температурной зоны в другую, включая зону максимальной температуры ( $950 - 1000^\circ\text{C}$ ). В конце топочной камеры остатки отходов догорают и остывает шлак, который потом сбрасывается в устройство выгрузки. Далее на входе в котел-утилизатор, в так называемой зоне дожигания, поток газов интенсивно перемешивается с воздухом, в результате дожигается токсичный оксид углерода. Процесс горения отходов регулируется и контролируется с центрального диспетчерского пульта, оснащенного компьютером.

В последнее время ряд экологов выступает против строительства мусоросжигательных заводов, не вникая в суть известных технических решений по подавлению вредных выбросов при сжигании ТБО, таких как диоксины и фураны.

Для городов с населением 500 тыс. человек и более представляется необходимым разработать местные городские программы по утилизации ТБО (в частности, более доступное мусоросжигание) с привлечением проектных и научно-исследовательских организаций. И прежде всего в решении этой важной проблемы инициатором должен выступать муниципалитет.

### *Список литературы*

1. Матросов, А. С. Проблемы санитарной очистки города Москвы [Текст] / А. С. Матросов // Известия Академии промышленной экологии. 1997. – № 1. – С.10 – 12.
2. Лебедев, В. М. Теплоэнергетика региона [Текст] / В. М. Лебедев. – Омск, 1998. – 102 с.
3. Пурим, В. Р. Твердые бытовые отходы – топливо для ТЭЦ малой мощности [Текст] / В. Р. Пурим, А. Н. Тугов. – М.: Аква-Терм, 2001. – № 2. – С. 91 – 93.
4. Левин, Б. И. Термические методы обезвреживания и энергетического использования твердых бытовых отходов [Текст]: Учебное пособие / Б. И. Левин, А. С. Матросов. – М.: Университет Российской академии образования, 1999. – 64 с.
5. Левин, Б. И. Использование отходов в качестве топлива путем экологически чистого обезвреживания с выработкой энергии (применительно к городскому хозяйству Москвы) [Текст] / Б. И. Левин, А. А. Бутко. – М.: Прима-Пресс, 2005. – 128 с.
6. Эскин, Н. Б. Разработка и анализ различных технологий сжигания бытовых отходов [Текст] // Н. Б. Эскин, А. Н. Тугов, М. А. Изюмов // Развитие технологий подготовки и сжигания топлива на электростанциях: Сб. науч. ст. / – Всероссийский теплотехнический ин-т. М., 1996. – С.77 – 84.

А. Г. Панюков

## ПОДБОР ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ OFDM-СИГНАЛОВ

*Для обеспечения качественной радиосвязи в диапазоне частот 2,4 ГГц с применением OFDM-сигналов была разработана схема устройства предварительной обработки сигналов. Для построения схемы устройства был проведен подбор электронных компонентов, отвечающих требованиям, сформулированным в статье.*

Цель данной статьи – описать процесс подбора электронных компонентов для устройства предварительной обработки OFDM-сигналов. Основная задача данного устройства – максимально очистить полезный сигнал от помех, внося при этом минимальное количество собственных шумов и искажений. Это позволит увеличить дальность и качество связи при сохранении исходной мощности сигнала на входе устройства.

От существующих приемных устройств такого рода, например, от WiMAX-модемов, [1, 2] описываемое устройство отличается более мощным и гибким каналом предварительной обработки сигналов, что позволит добиться лучших характеристик по дальности и качеству связи.

Рассматриваемое устройство выполняет следующие функции:

- прием и разделение OFDM-радиосигналов на каналы;
- подготовку радиосигналов к выделению полезной информации;
- детектирование наличия радиосигнала определенной модуляции (манипуляции) в определенной полосе частот.

Основные характеристики устройства: центральная частота принимаемого сигнала – 2,4 – 2,5 ГГц; ширина полосы частот принимаемого сигнала – 20 МГц; увеличенная дальность и надежность радиосвязи; гибкая настройка устройства для взаимодействия с различными радиосигналами и оконечными устройствами.

Для построения схемы и реализации устройства предварительной обработки OFDM-сигналов необходимы следующие электронные компоненты:

устройство понижения частоты входного сигнала (гетеродин, квадратурный демодулятор). Основные требования к нему: минимальная фазовая ошибка при преобразовании, разделение сигнала на квадратуры при преобразовании, минимальный дисбаланс значений амплитуды квадратур, низкое энергопотребление, простота использования, малые габариты;

синтезаторы частот для формирования тактового сигнала. Основные требования к ним: минимальная вносимая нестабильность генерируемого тактового сигнала, возможность переключения (подстройки) тактовой частоты «на горячую» и изменения мощности генерируемого сигнала «на горячую»;

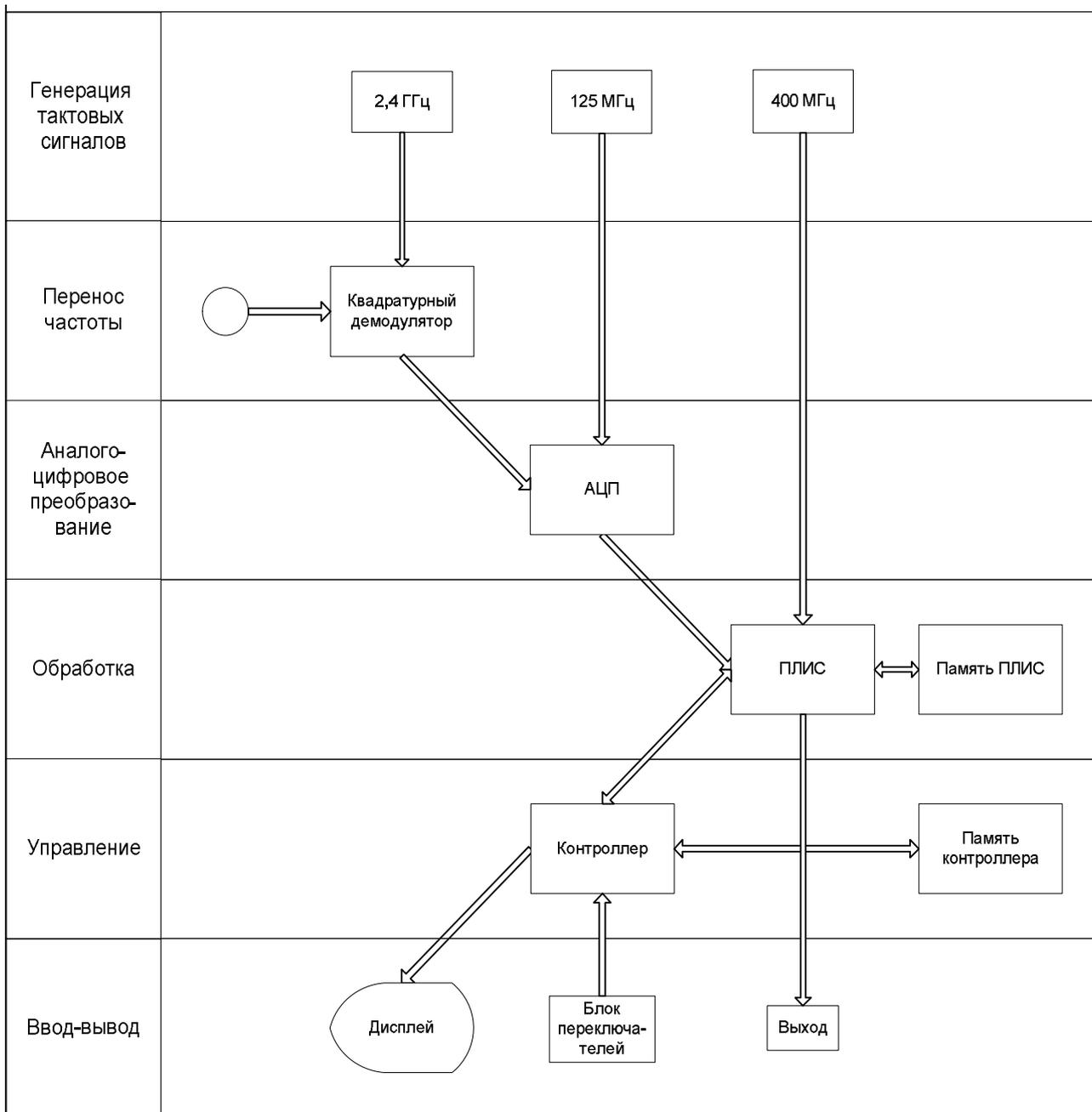
аналого-цифровой преобразователь. Основные требования к нему: высокая частота дискретизации (не менее 120 МГц), разрядность выходного сигнала не менее 12 бит, два независимых канала аналого-цифрового преобразования, дифференциальный интерфейс выходного сигнала, низкий уровень собственных шумов;

программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). Основные требования к ней: высокое быстродействие, поддержка большого числа стандартных интерфейсов, максимальная емкость при возможности вести разработку в свободно распространяемых версиях программного обеспечения (например, ISE WebPack);

микроконтроллер для взаимодействия с пользователем. Основные требования к нему: поддержка SPI, USART, I2C и других внешних интерфейсов, высокая производительность, большое число линий ввода-вывода

Функциональная схема устройства, представляющая его основные компоненты, изображена на рисунке.

Первым этапом выбора составляющих устройства был выбор аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Следует отметить, что многие АЦП от крупных производителей могут удовлетворить требованиям системы. Примером качественного АЦП с хорошими характеристиками является преобразователь фирмы Texas Instruments ADS62P45. Основные характеристики данного устройства [3]: частота дискретизации – 125 МГц; разрядность – 14 бит; два независимых канала преобразования; ослабление соседнего канала – 95 дБ; CMOS/LVDS-выходы; встроенные блоки цифровой обработки сигналов (отдельно на каждый канал); поддержка синусоидального, LVPECL, LVDS и LVCMOS тактовых сигналов амплитудой до 0,4 В минимум; стабилизатор тактового сигнала; встроенный генератор опорного напряжения поддерживает внешнее опорное напряжение; потребление – 799 мВт; питание – 3,3 В.



Функциональная схема устройства предварительной обработки OFDM-сигналов

Встроенные блоки цифровой обработки сигналов позволяют производить коррекцию сдвига АЦП, точную коррекцию усиления каналов с шагом 0,05 дБ, децимацию на 2/4/8, встраивать в обработку цифровые фильтры порядка 24 (ФНЧ, ФВЧ либо полосовой).

Для подготовки сигнала к выделению полезной информации предлагается использовать программируемую логическую интегральную схему, что позволит обеспечить значительный объем вычислительной нагрузки по выделению полезного сигнала из шумов, хорошее быстродействие при работе как с АЦП, так и с оконечными устройствами, гибкость в коммуникационных интерфейсах. Предлагается использовать ПЛИС фирмы Xilinx серии Virtex II – XC2V250 в корпусе FG256. Основные характеристики данного устройства [4]:

производительность: логическая емкость – 250 тыс. системных вентилей на кристалле, внутренняя тактовая частота – до 420 МГц, скорость обмена данными более – 840 Мбит/с по одному контакту ввода-вывода;

иерархическая система элементов памяти: 48 кбит распределенной памяти на кристалл, конфигурируемых либо как 16 битовое ОЗУ, либо как 16 битовое двухпортовое ОЗУ, либо как 16 битовый сдвиговый регистр, 432 кбит встроенной памяти на кристалл, реализуемой на блоках двухпортовой ОЗУ по 18 кбит;

специализированные встроенные модули для реализации арифметических функций: 24 блока умножителей  $18 \times 18$  бит, встроенная логика ускоренного переноса для реализации высокоскоростных арифметических операций, гибкая архитектура с балансом быстродействия и плотности упаковки логики, 3072 регистров (защелок) с разрешением тактирования и синхронным/асинхронным сбросом и установкой, 3072 четырехходовых функциональных генератора (4-LUT), каскадируемые цепочки для функций с большим количеством входов, внутренние шины с тремя состояниями;

быстродействующие встроенные цифровые модули управления синхронизацией (DCM): 8 модулей, точная подстройка фронтов тактирующих сигналов, умножение, деление частоты, сдвиг фазы с высоким разрешением, защита от электромагнитных помех, 16 мультиплексоров глобальных тактовых сигналов,

программируемые блоки ввода-вывода, поддерживающие большинство цифровых сигнальных стандартов: 172 программируемых пользователем блока ввода-вывода, 19 однополюсных и 6 дифференциальных стандартов ввода-вывода, программируемая нагрузочная способность по току (от 2 до 24 мА) на каждый вывод, программируемый импеданс для однополюсных стандартов в каждом блоке ввода-вывода;

дифференциальная передача сигналов: поддержка передачи сигналов со скоростью 840 Мбит/с по стандарту LVDS (Low-Voltage Differential Signaling), поддержка стандартов BLVDS (Bus LVDS), LDT (Lightning Data Transport), LVPECL (Low-Voltage Positive Emitter-Coupled Logic), встроенные входные и выходные регистры с удвоенной скоростью передачи данных;

конфигурация кристалла хранится во внешнем ПЗУ и загружается в кристалл после включения питания автоматически или принудительно: неограниченное число циклов загрузки, 5 режимов загрузки, шифрование конфигурационной последовательности по стандарту TRIPLE DES, поддержка конфигурирования по стандарту IEEE1532, возможность частичного реконфигурирования;

проектирование осуществляется пакетами программного обеспечения ISE Foundation и ISE Alliance, работающими на персональном компьютере или рабочей станции. Микросхемы емкостью до 300 тыс. вентилей поддерживаются бесплатным пакетом ISE WebPack;

напряжение питания ядра кристалла – 1,5 В, блоков ввода (вывода) от 1,5 до 3,3 В – в зависимости от запрограммированного сигнального стандарта; 100%-ное фабричное тестирование.

Следующий и не менее важный элемент устройства предварительной обработки OFDM-сигналов – квадратурный демодулятор, который служит для понижения несущей частоты входного радиосигнала. Такие устройства от ведущих производителей имеют примерно одинаковые характеристики. Предлагаемый к использованию демодулятор AD8347 представля-

ет собой прямой широкополосный квадратурный демодулятор с автоматическим регулированием усиления. У данного устройства можно отметить следующие преимущества: встроенный алгоритм автоматического регулирования усиления в широком диапазоне (69,5 дБ), фазовая ошибка – около  $1^\circ$ , дисбаланс амплитуд максимум 0,3 дБ, выходы напрямую совместимы с входами АЦП, широкий диапазон напряжений питания – 2,7 – 5,5 В.

Четвертая группа элементов схемы – синтезаторы частот.

Генерируют тактовые сигналы в схеме три устройства: квадратурный демодулятор, АЦП и ПЛИС.

Для переноса частоты радиосигнала необходим высокостабильный источник синусоидального колебания. В качестве такого источника может выступать синтезатор частот в паре с термокомпенсированным кварцевым генератором.

Использование интегрированного синтезатора частоты ADF4360-0 позволяет получить высокостабильное колебание с программно изменяемой частотой и мощностью тактового сигнала.

Для аналого-цифрового преобразования и обеспечения работы схемы необходим также высокостабильный источник тактового сигнала. С этой целью можно использовать интегрированный синтезатор частоты ADF 4360-8.

Отметим преимущества синтезаторов тактового сигнала семейства ADF 4360: программируемые мощность и частота выходного сигнала, размах выходного сигнала – от 0,4 до (VDD – 0,4) В, фазовая ошибка, –  $0,09 - 1,4^\circ$  (вносимый джиттер не более 2 пс).

Для обеспечения работы схемы в целом, конфигурирования отдельных узлов, взаимодействия с пользователем предлагается применять микроконтроллер фирмы STMicroelectronics – STM32F103C6 в корпусе LQFP100. Данный контроллер сочетает в себе производительное ядро, поддержку множества интерфейсов и невысокую стоимость. Его основные характеристики: ядро ARM 32-bit Cortex™-M3, тактовая частота – до 72 МГц, производительность – 1,25 DMIPS/МГц, нулевые задержки доступа к памяти, возможность производить операции умножения (деления) за 1 такт, 32 кб Flash-памяти, 10 кб оперативной памяти SRAM, питание и активный уровень портов ввода/вывода – от 2 до 3,6 В, ФАПЧ для тактирования ядра, два 12-битных АЦП, контроллер прямого доступа к памяти, 51 линия ввода-вывода, 6 таймеров, поддержка 5 коммуникационных интерфейсов: I2C, USART, SPI, CAN, USB.

Набор основных компонентов, приведенный в данной статье, позволит создать устройство с хорошим быстродействием, гибкое по отношению к используемым сигналам и оконечным устройствам.

Характеристики синтезаторов частот и АЦП должны обеспечить систему качественным цифровым сигналом на входах ПЛИС.

Стабильная частота тактирования ПЛИС вкупе с ее хорошим быстродействием обеспечат выполнение сложных алгоритмов очистки сигнала от мешающих воздействий.

Мощный контроллер с множеством поддерживаемых интерфейсов и тактовой частотой 72 МГц обеспечит высокую гибкость системы в настройке всех ее модулей.

## *Список литературы*

1. Васин, В. А. Радиосистемы передачи информации [Текст] / В. А. Васин, В. В. Калмыков, Ю. Н. Себекин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 472 с.
2. Шахнович, И. В. Современные технологии беспроводной связи [Текст] / И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
3. Черемисов, П. Быстродействие. Экономичность. Высокое разрешение [Текст] / П. Черемисов // Новости Электроники. 2010. – № 11. – С. 6 – 9.
4. Селезенкин, А. Обзор кристаллов ПЛИС компании Xilinx [Текст] / А. Селезенкин // Современная электроника. 2008. – № 3. – С. 16 – 18.

А. А. Запрудский

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ОПОРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ СТОЕК

*В статье рассмотрена предложенная методика определения момента трещинообразования и жесткости по высоте опоры. Для этого была разработана расчетная схема кольцевого сечения опоры, определены усилия в бетоне и арматуре. Предложена методика определения перемещения стойки под нагрузкой, определены дополнительные изгибающие моменты, обусловленные прогибом стойки.*

Отличие железобетонных опор от металлических заключается в их значительно большей гибкости и собственном весе. Объясняется это относительно небольшими поперечными размерами и значительным весом железобетонных труб, используемых в качестве стоек. По этой причине для одностоечных свobodностоящих опор необходимо учитывать усилия, создаваемые в стойке вертикальными нагрузками (собственный вес опоры, вес проводов и тросов, оборудования и гололедных отложений) при ее отклонении от вертикального положения в результате изгиба и поворота в грунте. Необходимость такого учета очевидна, поскольку опора со стойкой, имеющей большой разрушающий момент, но меньшую жесткость, в ряде случаев оказывается менее надежной, чем опора со стойкой, имеющей меньший разрушающий момент, но большую жесткость.

Важно учитывать зависимость жесткости железобетонного элемента от величины действующего усилия, которая проявляется особенно сильно при усилиях, превышающих трещиностойкость элемента.

На опоры контактной сети действуют одновременно кратковременные, длительные и постоянные нагрузки. Поперечные размеры стоек одностоечных свobodностоящих опор и их армирование определяются изгибом, который создается главным образом относящимися к кратковременным горизонтальными нагрузками от давления ветра и вертикальными нагрузками. При этом изгибающие моменты от действия вертикальных нагрузок на стрелах прогиба, обусловленных ветровыми нагрузками, относятся также к кратковременным, а изгибающие моменты от действия неуравновешенных вертикальных нагрузок в зависимости от характера последних – к кратковременным или длительным [1]. Наблюдения за промежуточными железобетонными опорами с ненапряженной продольной арматурой, имеющими значительно большую нагрузку со стороны пути, свидетельствуют об их большой чувствительности к изгибу, который создается неуравновешенным весом проводов, тросов, изоляторов и поддерживающих устройств. В связи с перечисленными особенностями возникает необходимость разработки методики расчета железобетонных опор с учетом деформаций.

Основным при расчете этих опор является определение усилий, действующих в сечениях железобетонной стойки, изгибающих моментов, перерезывающих и нормальных сил. В задаче расчета стойки входит определение усилий, действующих в расчетных сечениях. Усилия от горизонтальных и от вертикальных нагрузок определяются отдельно без учета деформации опоры. Перерезывающие силы создаются в основном горизонтальными нагрузками (давление ветра на провода, тросы и конструкцию опоры), а также изломом проводов в кривых.

Для сравнения произведен расчет двух опор – с нормальными и увеличенными габаритами (далее по тексту – «опора 1», «опора 2»), расположенных в кривой радиусом 2000 м. На опоре смонтированы цепная контактная подвеска, усиливающий провод, линии продольного электропитания и оптоволоконная, волновод и трос группового заземления. Нагрузки определялись для двух расчетных режимов – максимального ветра 35 м/с (МВ) и гололеда 20 мм с ветром 15 м/с (Г+В).

Суммарный изгибающий момент относительно нужного расчетного сечения определяется как сумма моментов от горизонтальных и вертикальных нагрузок на провода и тросы, усилий, возникающих при изломах проводов в кривых и зигзагах.

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

1. Для расчета нагрузок на опорные конструкции контактной сети было использовано Программное обеспечение для расчета несущей способности опор контактной сети «РНС» (таблица 1).

Таблица 1 – Результирующие изгибающие моменты в расчетных режимах (опора 1)

Расчетный режим	Направление ветра	Расположение в кривой	Изгибающий момент, кНм
МВ	От опоры на путь	Внутренняя сторона	95814
МВ	От опоры на путь	Внешняя сторона	53136
МВ	От пути на опору	Внутренняя сторона	-40170
МВ	От пути на опору	Внешняя сторона	-82848
МВ	От опоры на путь	Отсутствует	74472
МВ	От пути на опору	Отсутствует	-61506
Г+В	От опоры на путь	Внутренняя сторона	70290
Г+В	От опоры на путь	Внешняя сторона	27612
Г+В	От пути на опору	Внутренняя сторона	-21448
Г+В	От пути на опору	Внешняя сторона	-64126
Г+В	От опоры на путь	Отсутствует	48948
Г+В	От пути на опору	Отсутствует	-42784

Наибольшие изгибающие моменты создают ветровые нагрузки даже в режиме гололеда с ветром, а горизонтальные нагрузки имеют меньшие величины и частично компенсируют друг друга. Суммарные моменты от горизонтальных и вертикальных нагрузок для опор 1 и 2 представлены в таблице 2. Из приведенных в таблице 2 данных видно, что за счет увеличенного габарита консоли опоры 2 значительно повышается результирующий изгибающий момент, а также многократно возрастает доля момента от вертикальных нагрузок, хотя оборудование опор 1 и 2 одинаково.

Таблица 2 – Соотношение изгибающих моментов от горизонтальных и вертикальных сил для различных схем опор

Номер опоры	Момент от вертикальных нагрузок, кНм (в % от результирующего)	Момент от горизонтальных нагрузок, кНм (в % от результирующего)	Результирующий момент, кНм
1	3280 (4,66)	67110 (95,34)	70390
2	26890 (32)	61410 (68)	83800

После определения действующих сил и изгибающих моментов необходимо произвести расчет перемещения стоек под нагрузкой.

Для определения прогибов железобетонных элементов, работающих с трещинами, в расчете следует учитывать жесткость, вычисленную с учетом трещин в растянутой зоне.

При приложении сверхнормативной нагрузки по высоте железобетонной опоры имеют место три стадии напряженно-деформированного состояния опоры (рисунок 1):

- 1) характеризует сопротивление железобетонного элемента, работающего без трещин;
- 2) характеризует сопротивление железобетонного элемента, имеющего трещины;
- 3) характеризует наступление в сечении предельного состояния по прочности (разрушения).

В элементе с трещинами изгибная жесткость изменяется по длине элемента. При этом ошутимое отличие в изгибных жесткостях может наблюдаться даже в соседних сечениях. Изменение изгибных жесткостей  $D$  по высоте опоры, работающей с трещинами, схематично показано на рисунке 1.

Учет фактической функции изменения жесткости по длине элемента существенно усложняет расчет прогибов. В инженерных расчетах прибегают к определенным упрощениям, которые основываются главным образом на усреднении жесткости сечений на участке между трещинами и жесткости в сечениях, проходящих через трещину (см. рисунок 1, штриховая линия).

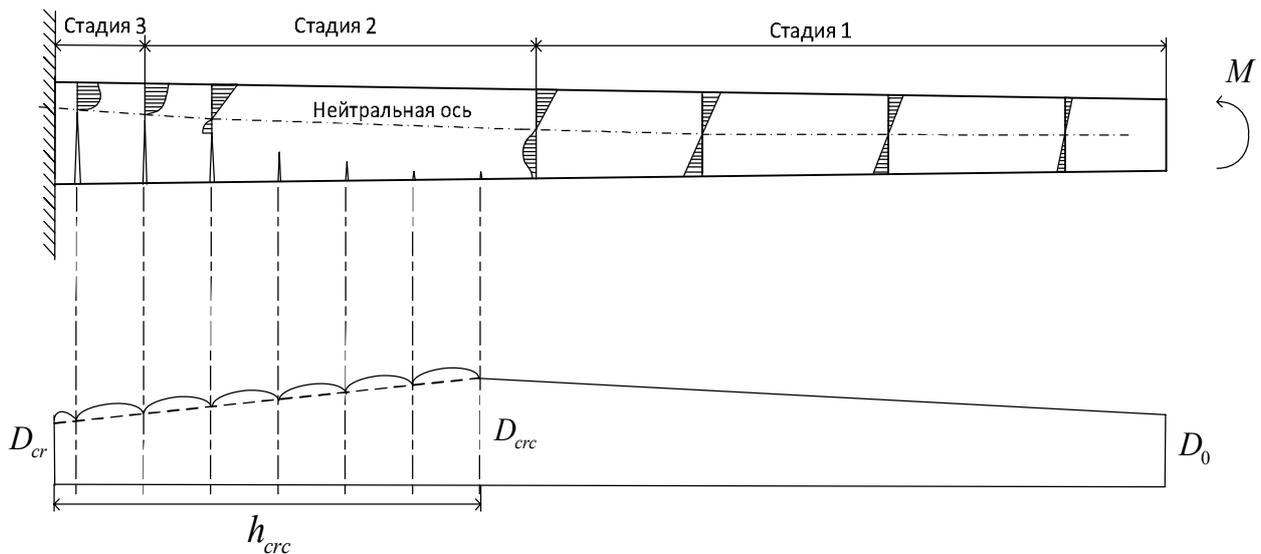


Рисунок 1 – Изменение стадий напряженно-деформированного состояния и распределение изгибных жесткостей по длине опоры с трещинами

Как видно из рисунка 1, после образования первой трещины на высоте  $h_{cr}$  происходит снижение жесткости до величины  $D_{cr}$ , соответствующей наименьшей жесткости в момент разрушения опоры. Нахождение момента трещинообразования  $M_{cr}$  производится по методике определения усилий в сечении. Для определения закона изменения жесткости на участке с трещинами необходимо найти жесткость сечения с наиболее удаленной от уровня заземления трещиной. Поэтому необходимо произвести расчет сечения, учитывая работу растянутого бетона, чтобы определить момент, при котором бетон достигает предельных деформаций при растяжении ( $\varepsilon = \varepsilon_{bt2}$ , рисунок 2).

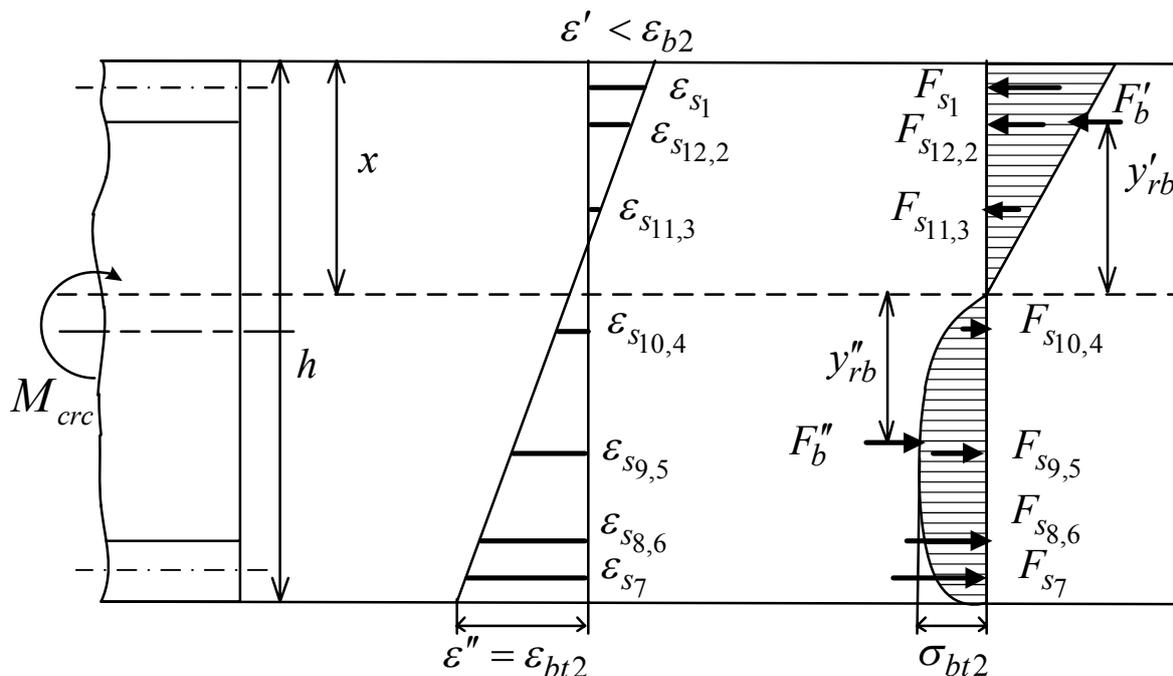


Рисунок 2 – Распределение усилий и деформаций в сечении в состоянии, предшествующем образованию трещины

Уравнение равновесия сил в сечении:

$$\begin{cases} F'_b + F''_b + \sum_{i=1}^n F_{s_i} = 0; \\ M_{crc} - M_b - M_s = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $F'_b, F''_b$  – равнодействующие усилий в бетоне сжатой и растянутой зон;

$F_{s_i}$  – усилие в  $i$ -м арматурном стержне;

$M_b, M_s$  – моменты бетона и арматуры относительно выбранной оси по высоте сечения.

Для описания полной диаграммы деформирования бетона в условиях растяжения допускается использовать следующую аналитическую зависимость:

$$\sigma_{bt} = R_{bt}(1.2\eta_1 - 0.2\eta_1), \quad (2)$$

где  $R_{bt}$  – прочность бетона на растяжение;

$$\eta_1 = \frac{\varepsilon_{bt}}{\varepsilon_{bt,red}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{bt,red}$  – относительная деформация, соответствующая пиковой точке диаграммы деформирования.

Деформирование арматуры и бетона в условиях сжатия-растяжения описывается аналитическими выражениями, приведенными в работе [2].

В расчетном сечении назначаем положение нейтральной оси (см. рисунок 2). В первом приближении высоту сжатой зоны можно принять равной половине высоты сечения. Реальное положение нейтральной оси определяется методом итераций.

Далее определяются усилия в каждом арматурном стержне, равнодействующие усилий бетона сжатой и растянутой зон и точки их приложения, после чего проводится проверка равновесия усилий с учетом принятой точности измерений. Если условие не сходится, то принимается новое положение нейтральной оси и проводится повторный расчет. После всех вычислений определяется результирующий момент, который является моментом трещинообразования для данного сечения с учетом принятой начальной деформации. Алгоритм описанного расчета прочности представлен на рисунке 3.

Аналогично производится расчет еще одного сечения в зоне  $h_{crc}$  (обычно трещины появляются в нижней части опоры на высоте 1 – 2 м). Зная моменты трещинообразования двух сечений, можно найти момент трещинообразования в нужном сечении согласно расчетной эпюре изгибающих моментов, а следовательно, точку, в которой происходит излом графика жесткости.

Для определения жесткости опоры на уровне заделки необходимо найти площадь поперечного сечения бетона, оставшегося в работе. Эта площадь вычисляется как сумма площадей бетона сжатой зоны и бетона растянутой зоны высотой  $x'$ , ограниченного нейтральной осью с одной стороны и трещиной – с другой (рисунок 4), который может быть найден как

$$x' = R(1 + \cos \varphi) \frac{\varepsilon_{bt}}{\varepsilon_s}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_s$  – деформации наиболее растянутой арматуры рассматриваемого сечения.

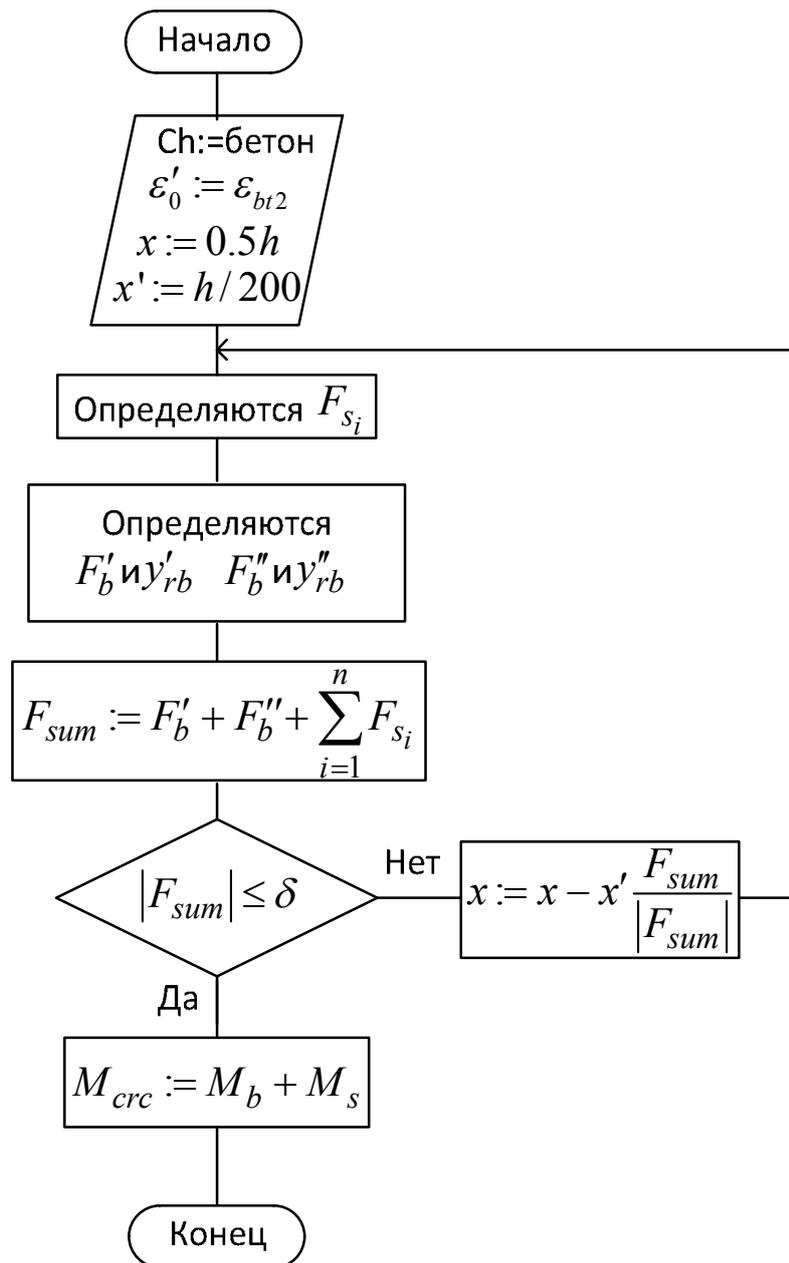


Рисунок 3 – Итерационный алгоритм расчета сечения опоры

Жесткость кольцевого сечения железобетонной опоры с ненапряженной арматурой может быть определена по формуле:

$$D = 0,15E_b \frac{I_b(h)}{\varphi_i(0,3 + \delta_e)} + 0,7I_s(h) \cdot E_s, \quad (5)$$

где  $E_b$ ,  $E_s$  – начальные модули упругости бетона и арматуры соответственно;

$\varphi_i$  – коэффициент, учитывающий влияние длительного действия нагрузки на прогиб элемента;

$\delta_e$  – коэффициент, принимаемый  $e_0/2R$  ( $e_0$  – эксцентриситет приложения нагрузки), но не менее 0,15;

$I_b(h)$ ,  $I_s(h)$  – моменты инерции соответственно бетонного сечения и сечения всей арматуры относительно центра тяжести бетонного сечения, являющиеся функцией от высоты.

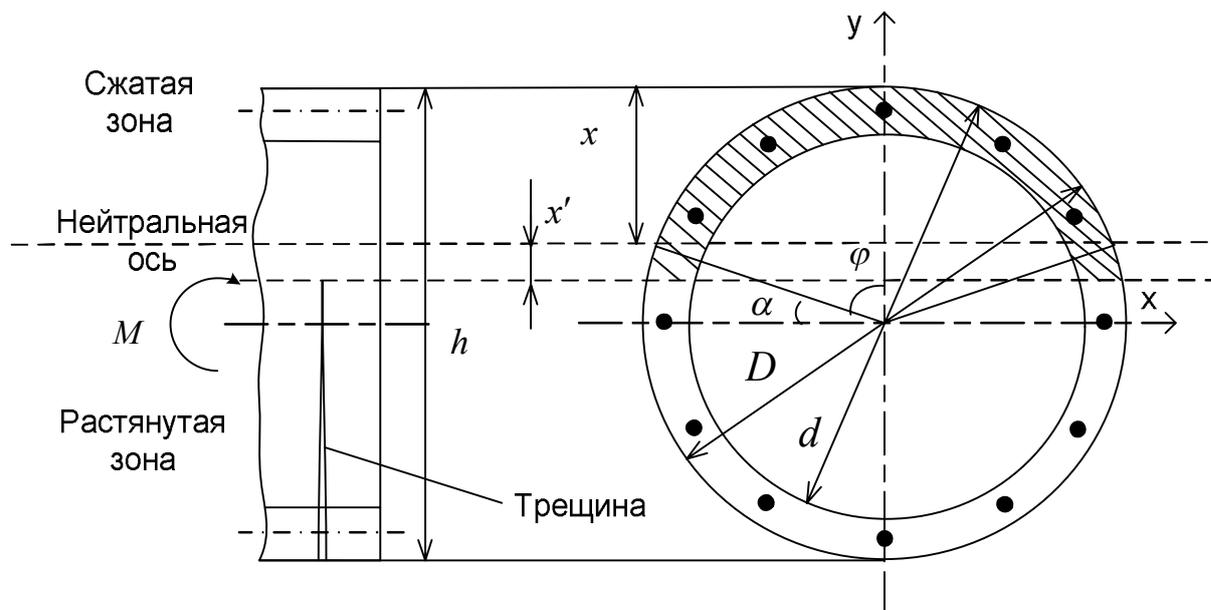


Рисунок 4 – Расчетная схема поперечного сечения опоры

Внешний диаметр опоры в произвольном сечении определяется по формуле:

$$D(h) = D_0 - kh, \quad (6)$$

где  $D_0$  – внешний диаметр опоры на отметке заделки;

$k$  – коэффициент коничности (сбег) опоры.

Внутренний диаметр опоры

$$d(h) = D(h) - 2b, \quad (7)$$

где  $b$  – толщина стенки опоры.

Расстояние от центра опоры до арматуры в произвольном сечении

$$r_s(h) = \frac{D(h) - b}{2}. \quad (8)$$

Выражение для описания момента инерции бетонного сечения с учетом образования трещин можно записать в виде: если  $h_{crc} < h \leq h_0$ , то  $I_b(h) = \pi \frac{(D(h)^4 - d(h)^4)}{64}$ ;  $0 \leq h \leq h_{crc}$ ,

$$\text{то } I_b(h) = \left( \arcsin \left( \sin \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) + (1 + \cos \phi) \frac{\varepsilon_{bt}}{\varepsilon_s} - \frac{\pi - \phi}{h_{crc}} h \right) \right) \frac{(D(h)^4 - d(h)^4)}{64}.$$

Момент инерции арматурного сечения

$$I_s(h) = \frac{A_s r_s(h)^2}{2}. \quad (9)$$

Жесткость кольцевого сечения железобетонной опоры с напряженной арматурой, а также со смешанным армированием

$$D = \frac{6,4E_b}{\pi^2} \left( \frac{I_b(h)}{\phi_i} \left( \frac{0,11}{0,1 + \frac{\delta_e}{\phi_p}} + 0,1 \right) + \frac{E_s I_s}{E_b} \right), \quad (10)$$

где  $\phi_p$  – коэффициент, учитывающий влияние предварительного напряжения арматуры на жесткость элемента при равномерном обжатии сечения напрягаемой арматурой.

Так как принятие усредненной жесткости по высоте опоры может привести к большим погрешностям в расчетах, необходимо использовать точную модель, учитывающую изменение жесткости по высоте опоры согласно изменению геометрических характеристик сечения. Уместно также использование трехступенчатой модели, заключающейся в разбиении опоры на три участка для усреднения жесткости по длине каждого из них [3].

Сравнение различных моделей жесткостей приведено на рисунке 5 (модель 1 – трехступенчатая, 2 – переменной жесткости по высоте опоры без учета трещин, 3 – переменной жесткости по высоте опоры с учетом трещин).

Оценка различия в жесткостях может быть выполнена при расчете прогибов для общего случая, когда горизонтальная сила приложена на высоте  $H$ , а прогиб определяется на высоте  $h$ . Для определения прогиба использован первый член интеграла Мора, имеющий вид:

$$f = P \int_0^h \frac{(H-x)(h-x)}{D(x)} dx. \quad (11)$$

На рисунке 5 приведены функции распределения жесткости по высоте опоры (на примере стойки ЖБК-6/13.6) с использованием различных моделей жесткости.

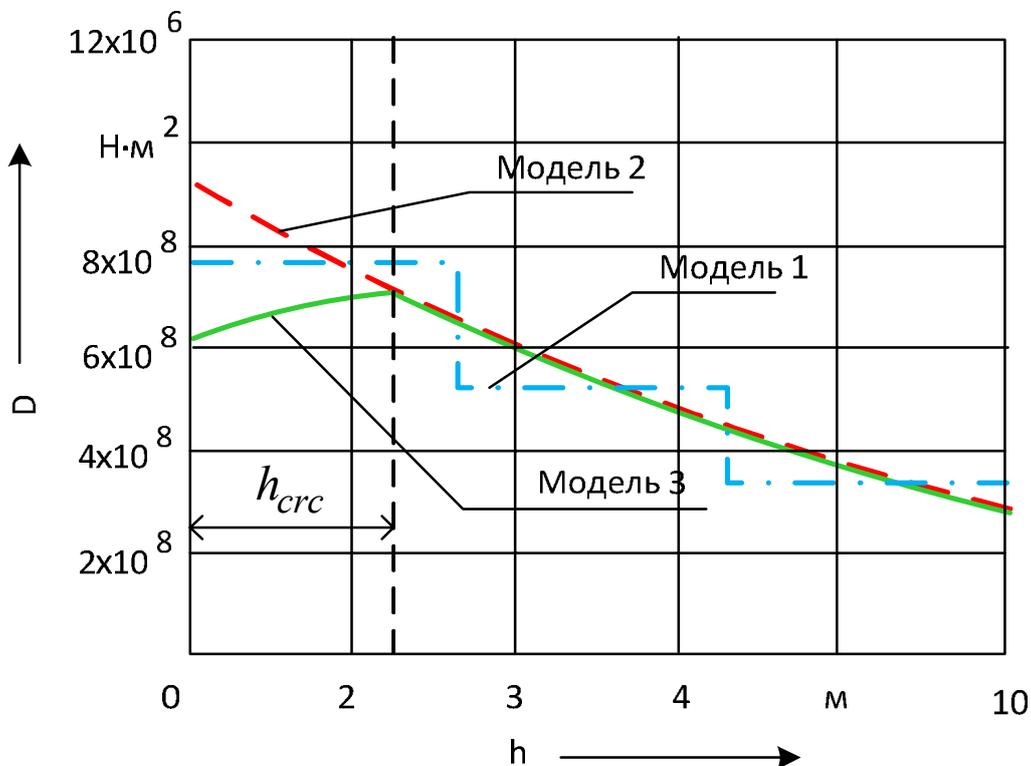


Рисунок 5 – Распределение жесткости по высоте опоры

Отклонения верха стойки при использовании различных расчетных моделей жесткости в зависимости от приложенной силы представлены на рисунке 6.

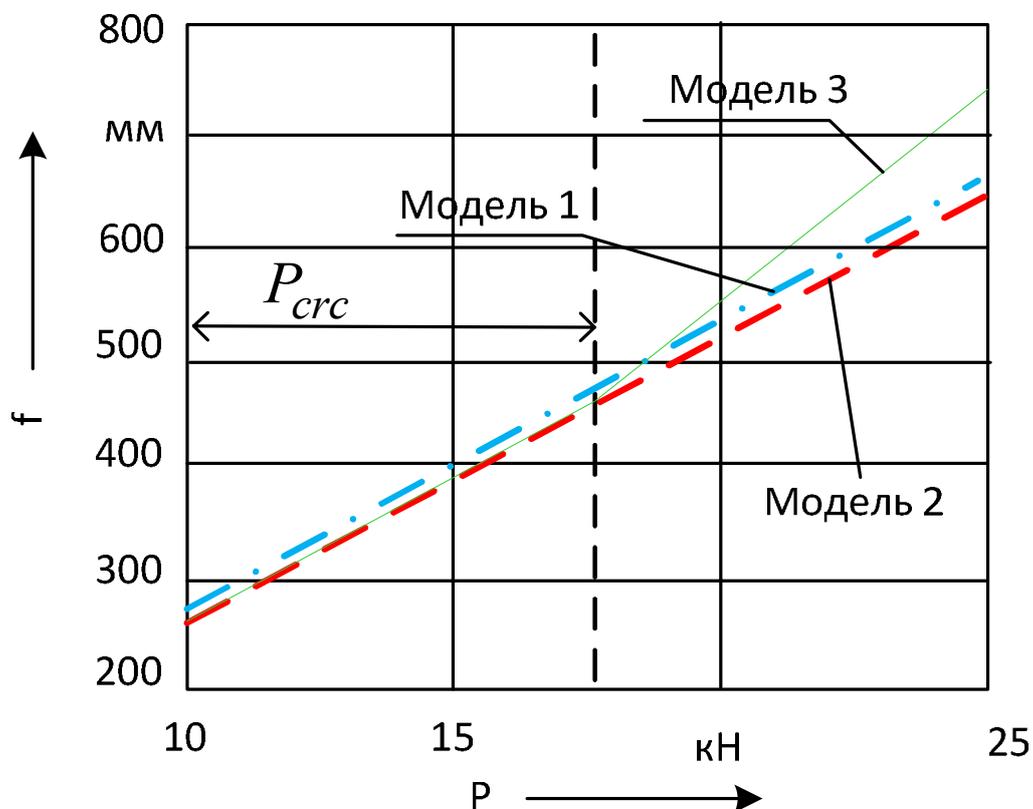


Рисунок 6 – Отклонение верха опоры в зависимости от величины приложенной силы

Как видно из представленных на рисунке 6 графиков, использование трехступенчатой модели жесткости дает незначительную погрешность по сравнению с моделью 2, приводящую к завышению прогиба, но использование модели без учета трещин неприемлемо, так как значительно занижает максимальный прогиб.

Стойки с преднапряженной арматурой имеют большую жесткость по сравнению с ненапряженной. На рисунке 7 приведены графики изменения жесткости по длине стоек СКУ (стойка коническая усиленная) и ЖБК равной мощности. Большой момент трещинообразования у стоек СКУ обеспечивает меньшую зону появления поперечных трещин ( $h_{crc2} < h_{crc1}$ ). Повышенная жесткость обеспечивает значительно меньшие прогибы в эксплуатационных условиях (до образования трещин), но с появлением трещин ситуация меняется и жесткость сечений напряженных стоек в зоне трещинообразования снижается в связи с потерей преднапряжения. В сечениях с большой глубиной распространения трещин она оказывается даже меньшей, чем у стоек, армированных ненапряженной арматурой.

Стоит отметить, что струнобетонные стойки имеют повышенную жесткость и трещиностойкость только при сохранении высоких значений напряжения арматуры. В процессе эксплуатации за счет релаксации напряжений стали, температурных воздействий, усадки и ползучести бетона, а также ряда других факторов происходит потеря напряжений арматуры, что приводит к снижению жесткости конструкции. На рисунке 8 представлена зависимость максимального прогиба стойки при предельной нагрузке от величины напряжения арматуры.

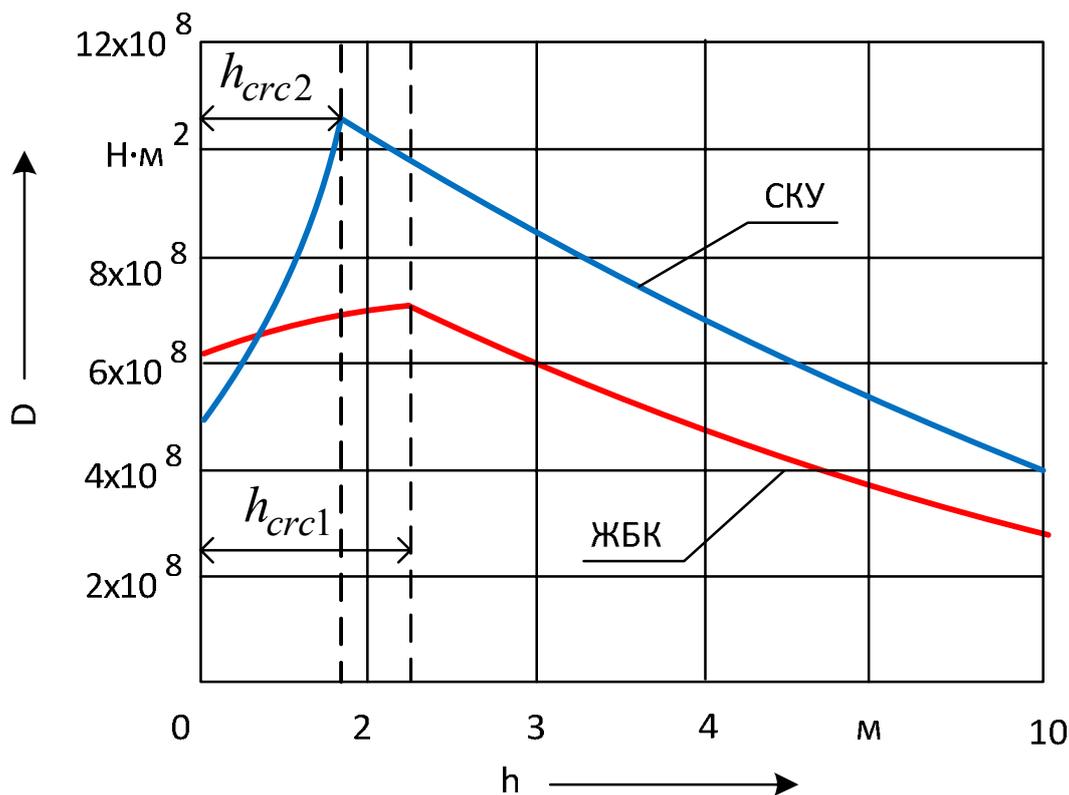


Рисунок 7 – Распределение жесткости стоек ЖБК и СКУ по высоте

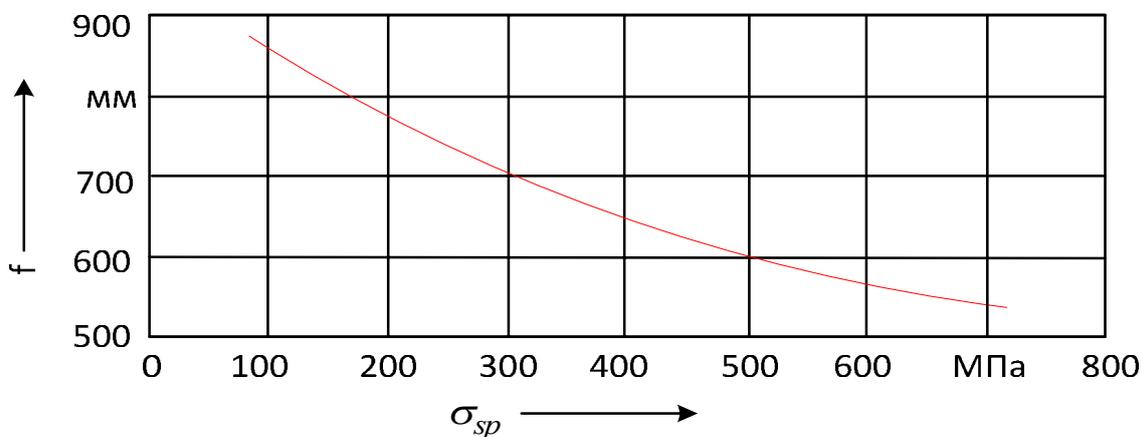


Рисунок 8 – Зависимость перемещения верха опоры от снижения напряжения арматуры

Стойки со смешанным армированием (типа СС) имеют жесткость, сравнимую с жесткостью стоек СКУ, так как меньшая величина предварительного напряжения ( $\sigma_{sp} = 450$  МПа) частично компенсируется дополнительным сечением ненапряженной арматуры.

Для расчета перемещения стойки под воздействием эксплуатационных нагрузок необходимо определить закон изменения изгибающего момента по высоте опоры. Эпюра изгибающих моментов в одном из вариантов сочетания нагрузок приведена на рисунке 9.

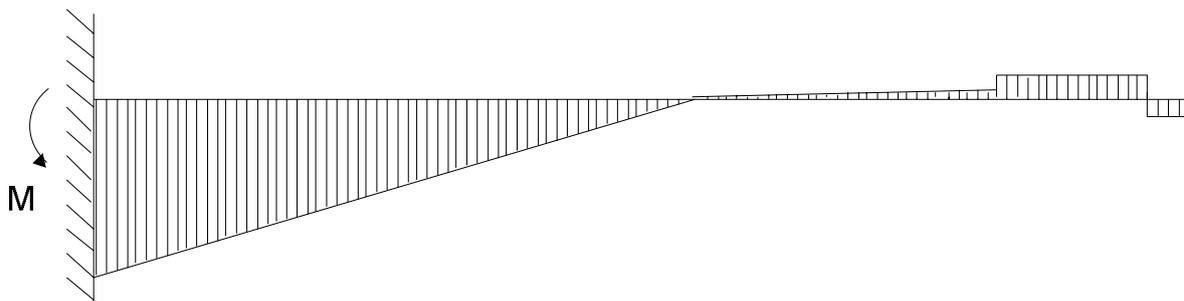


Рисунок 9 – Эпюра изгибающих моментов

Так как влияние распределенной ветровой нагрузки на опору невелико по сравнению с другими нагрузками, то можно считать, что эпюра изгибающих моментов ограничена прямыми линиями. Для такой формы эпюры перемещение удобно определять с помощью графоаналитического способа Верещагина для вычисления интеграла Мора:

$$\int_l M_z(x) \cdot M_z^1(x) dx = \omega y_c, \quad (12)$$

где  $\omega$  – площадь эпюры;

$y_c$  – ордината эпюры, взятая под центром тяжести площади  $\omega$ .

Так как сечение опоры неодинаково по высоте, то при вычислении перемещений сечений способом Верещагина интеграл Мора по всей длине стойки надо заменить суммой интегралов по участкам, в пределах которых эпюра моментов от единичной нагрузки не имеет изломов. Тогда выражение для определения максимального прогиба принимает вид:

$$\sum_{i=1}^n \int_l \frac{M_z(x) \cdot M_z^1(x)}{EI_z} dx = \sum_{i=1}^n \frac{\omega y_c}{D(x)}. \quad (13)$$

В дальнейшем необходимо построить эпюру изгибающих моментов от единичной нагрузки и разбить эпюры от заданных нагрузок на отдельные площади  $\omega_i$  и вычислить ординаты  $y_{ci}$  единичной эпюры под центрами тяжести этих площадей.

Перемещение  $i$ -й точки определяется с помощью выражения:

$$f_i = \sum_{i=n}^1 \left[ \omega_{\square i} \cdot \left( x_{c\square i} + \sum_{j=n-1}^i x_j \right) + \omega_{\Delta i} \cdot \left( x_{c\Delta i} + \sum_{j=n-1}^i x_j \right) \right], \quad (14)$$

если  $|M_{i+1}| \geq |M_i|$ , то  $\omega_{\square i} = h_i \frac{M_i}{D_i}$ ;  $x_{c\square i} = \frac{1}{2} h_i$ ;  $\omega_{\Delta i} = \frac{h_i}{2} \left( \frac{M_{i-1}}{D_{i-1}} - \frac{M_i}{D_i} \right)$ ;  $x_{c\Delta i} = \frac{2}{3} h_i$ .  $|M_{i+1}| < |M_i|$

$\omega_{\square i} = h_i \frac{M_{i-1}}{D_{i-1}}$ ;  $x_{c\square i} = \frac{1}{2} h_i$ ;  $\omega_{\Delta i} = \frac{h_i}{2} \left( \frac{M_i}{D_i} - \frac{M_{i-1}}{D_{i-1}} \right)$ ;  $x_{c\Delta i} = \frac{1}{3} h_i$ ,

где  $\omega_{\square i}$ ,  $\omega_{\Delta i}$  – площади прямоугольной и треугольной составляющих  $i$ -го участка эпюры изгибающих соответственно;

$x_{c\square i}$ ,  $x_{c\Delta i}$  – координаты центров масс площадей  $\omega_{\square i}$ ,  $\omega_{\Delta i}$ .

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Суммарный дополнительный изгибающий момент определяется по формуле:

$$M_{don} = \sum_{i=1}^n G_i f_i, \quad (15)$$

где  $G_i$  – нагрузки от элементов;

$n$  – количество нагрузок;

$f_i$  – прогибы стойки в точках приложения нагрузок.

По разработанной методике были рассчитаны прогибы опор 1 и 2 и определены дополнительные изгибающие моменты (таблица 3). Данные в таблице 3 приведены для режима ветра с гололедом, так как в этом случае вертикальные нагрузки достигают максимальных величин.

Таблица 3 – Дополнительные изгибающие моменты, обусловленные прогибом опоры

Изгибающие моменты	Опора 1	Опора 2
Момент от вертикальных нагрузок, кНм	3280	22390
Момент от вертикальных нагрузок (без учета их направления), кНм	32110	38080
Дополнительный изгибающий момент, кНм	3613	5420
Приращение момента от вертикальных нагрузок (результатирующего момента), %	110,2/5,04	24,2/6,12

На основе полученных результатов можно отметить, что в случае больших моментов от вертикальных нагрузок, уравновешенных в нормальном режиме, возникает большое приращение результирующего момента от прогиба опоры в расчетном режиме. Такая ситуация наиболее выражена в том случае, когда режим гололеда с ветром является наиболее тяжелым для опоры, так как основная вертикальная нагрузка создается весом проводов и тросов с гололедом. В связи с изложенным выше при определении допустимых нагрузок на опорные конструкции контактной сети рекомендуется производить расчет стоек по деформированной схеме для расчета дополнительных изгибающих моментов.

## Список литературы

1. Михеев В. П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник. [Текст] / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.
2. СНБ 5.03.01-02. Конструкции бетонные и железобетонные. – Минск.: Стройтехнорм, 2002. – 274 с.
3. Фрайфельд А. В. Проектирование контактной сети [Текст] / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.

В. В. Поздеев, В. В. Крайнов

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*Рассмотрена модель аварийного взрыва при транспортировке взрывчатых веществ (ВВ) на железнодорожном транспорте. С целью уменьшения зоны поражения окружающих объектов от возникших ударных волн при взрыве предлагается изменить форму транспортировки ВВ в вагоне в виде кумулятивных зарядов. При этом основная часть энергии взрыва будет направлена в сторону, противоположную железнодорожному полотну – вверх по направлению кумулятивной выемки заряда ВВ.*

Любой технологический процесс можно рассматривать как созидательный, но в то же время и как процесс с определенным риском нанесения вреда людям или окружающей среде. Случайные взрывы [3] могут происходить при хранении, транспортировке, изготовлении и практическом применении взрывчатых веществ. Причиной их возникновения чаще является процесс горения или неконтролируемое развитие экзотермической реакции (химической реакции, сопровождающейся выделением теплоты). Транспортировка ВВ всегда сопровождается существенным риском случайных взрывов в сравнении с перевозкой обычных грузов на любых видах транспорта. Отдельные цифры статистики показывают, что при транспортировании ВВ к месту производства взрывных работ [1] в 2004 г. произошли четыре аварии, в результате которых погибли два человека, были уничтожены транспортные средства, почти 8 т (7989,8 кг) ВВ, 340 шт. электродетонаторов (ЭД) и 400 м детонирующего шнура (ДШ). Аварии произошли при перевозке ВВ в ОАО «Гайский ГОК», «Ямалгеофизика», «Бурятзолото». В ООО «Кемеровозврывпром» авария произошла при перевозке эмульсионного ВВ типа «Порэмит 1». Особо крупные аварии с наличием ВВ произошли в 1988 г. на станциях Арзамас-2 и Свердловск-Сортировочный.

В соответствии с распоряжением Администрации Президента РФ и аппарата Правительства РФ от 06.08.2004 г. № 1363/1001 вновь созданная служба, именуемая как «Ростехнадзор» [1], имеет своей основной функцией решение задач в области обеспечения промышленной безопасности и охраны недр при производстве и транспортировке ВВ. Разработанные методики перевозки, организация проверок и пресечение возможных административно-уголовных нарушений представляют скорее административно-правовые и организационные мероприятия, чем инженерно-технические рекомендации по снижению возможных аварийных ситуаций и их последствий. На этом фоне возникает потребность технического разрешения вопроса о снижении возможных поражающих факторов в случаях взрыва ВВ при перевозке их на железнодорожном, автомобильном и других видах транспорта.

Перевозка, складирование, выдача, временное хранение (складирование) ВВ на железнодорожном транспорте может осуществляться

в виде транспортировки чистого изделия ВВ различной мощности и назначения (используемого при производстве взрывных работ в горнодобывающей промышленности, в тоннелестроении, в дорожном строительстве и т. п.);

в виде военных боеприпасов (БП) (чистое ВВ, средства взрывания (СВ), авиационные, артиллерийские, инженерные боеприпасы различного предназначения, включая химические, специальные и др., боеприпасы, подлежащие уничтожению).

Аварийный (несанкционированный) взрыв может привести к разрушению окружающих объектов, поражению людей, нанесению ущерба в виде уничтожения материальных ценностей и к нарушению окружающей среды в виде:

1) механического воздействия от взрыва самого ВВ, СВ и от метаемых фрагментов разрушенных корпусов вагонов, упаковок (тары) ВВ, имущества, корпусов боеприпасов (обо-

лочки, осколки, неразорвавшиеся боеприпасы) и т. п. Результатом механического воздействия может быть разрушение участков путей (образование взрывных воронок) вблизи от находящихся на путях железнодорожных составов (особенно опасно при нахождении рядом составов с химическими, нефте- и газопродуктами, сильно действующими ядовитыми веществами (СДЯВ), аварийно химически опасными веществами (АХОВ) и т. д.), путевых зданий и сооружений, инженерных коммуникаций;

2) распространения воздушной ударной волновой (ВУВ) нагрузки ( $\Delta P_{\phi}$ ) и ее поражающих факторов. Помимо ВУВ при мощном взрыве может распространяться и серия (цуг) сейсмозврывных волн в грунте, вызывающих колебания конструкций сооружений, разрушение коммуникаций, нарушение герметичности трубопроводов и т. п.;

3) тепловой нагрузки, образуемой при взрыве, следствием которой являются пожары, возможная передача детонации на другие вагоны при перевозке большого количества ВВ или боеприпасов.

ВВ имеют ряд параметров, влияющих на безопасность (риск) при их транспортировке:

1) чувствительность к внешним воздействиям (особенно это относится к инициирующим ВВ) – тепловым, механическим, химическим, электрическим, взрывным и т. д.;

2) способность к детонации и последующему взрыву;

3) возможность в результате горения переходить к детонации.

Рассматривая физико-химические свойства ВВ, можно отметить, что характерным для всех ВВ является способность практически мгновенного превращения их из твердого или жидкого состояния в газообразное с выделением большого количества теплоты (тепловая энергия) и образованием первоначально сильно сжатых газов (кинетическая энергия) [4]. Обычные ВВ при взрывах позволяют получать скорость движения газов до 7000 – 8000 м/с, метания твердых тел – до 3000 – 4000 м/с, при этом значения давления составляют более  $10^4$  МПа, а температура может достигнуть 5000°C.

Наиболее упрощенной моделью изучения физики взрыва является заряд ВВ кубической или сферической формы (рисунок 1), схема разлета продуктов взрыва последнего представляет собой несколько измененную форму относительно сферы [5], для которой присуще равномерное распределение давления продуктов взрыва по внутренней оболочке заряда. Удлиненный же заряд (УЗ) может рассматриваться как группа сосредоточенных зарядов (СЗ) сферической или кубической формы. Характерной особенностью разлета взрывных газов кубического заряда ВВ, форма которого наиболее близка к форме размещения ВВ в вагонах, является движение их в основном перпендикулярно к поверхности заряда с незначительным отклонением в сторону, противоположную месту инициирования взрыва [4].



Рисунок 1 – Схемы разлета продуктов взрыва различной конфигурации

Имеющиеся фотоснимки, выполненные при проведении ряда опытов на зарядах различной поверхности (шар, куб, пирамида, конус), показали наличие следов взрывных газов, направленных перпендикулярно к плоскостям поверхностей. При этом в пространстве, определенном углами этих поверхностей, взрывные газы не распространяются (рисунок 1, а) –

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

здесь располагаются так называемые *защитные зоны* [4]. И, наоборот, в срединной части граней поверхностей зарядов наблюдается наиболее интенсивный поток взрывных газов, т. е. имеет место *направленное действие взрыва*.

Ввиду большого многообразия факторов для исследования данного вопроса с целью получения количественной характеристики взрывного процесса, включающей в себя непосредственно источник горения (взрыва), расстояние от источника взрыва до земной поверхности (железнодорожного полотна), состояние поверхности земли, погодные условия, условия возникновения взрыва, типы и характеристики перевозимого ВВ, возможности передачи детонации взрыва, различного рода оболочки тары, корпусов боеприпасов, условия размещения и крепления их в вагоне, характеристики замкнутого (полузамкнутого) пространства вагона, тип вагона и т. д., создание математической модели описания процесса и последствий взрыва становится достаточно сложной задачей. Очевидно, что исключение влияния ряда факторов на весь процесс взрыва в целом искажает реальную картину. Однако сама *идея изменения* (внесения нового) *конструктивного решения размещения ВВ в вагоне в виде кумулятивной выемки в сторону, противоположную железнодорожному полотну, придание направленности даже случайному взрыву и ограничение (уменьшение воздействия поражающих факторов) распространения УВ в стороны от вагона с ВВ* требует начала изучения этого практического вопроса даже при определенных грубых допущениях. Поэтому для приближенной оценки случайного взрыва при разработке теоретической модели транспортируемого ВВ (рисунок 2) примем следующее:

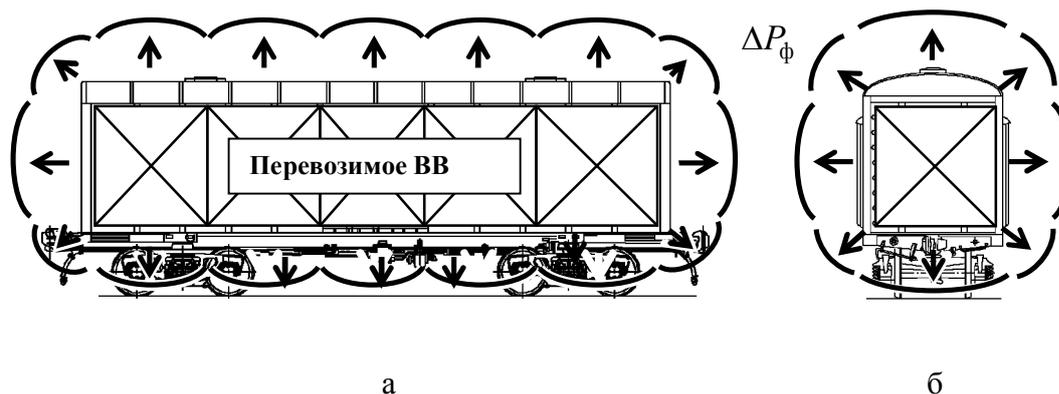


Рисунок 2 – Схема неконтролируемого взрыва УЗ (СЗ) ВВ, размещаемого в железнодорожном вагоне

1) ВВ, СВ и ДШ, находящиеся в ящиках (упаковках, мешках и т. д.) и в определенной нормативными документами форме складирования в вагонах, представляют собой *единый сплошной заряд, располагаемый по длине вагона (УЗ) или в виде отдельных штабелей – в виде куба (СЗ)*;

2) военные боеприпасы (снаряды, мины, изделия и т. п.) также представляют собой единый УЗ с соотношением высоты и длины штабелей  $h/l = 1/5$  и более, влиянием материала оболочек и формой БП, их толщиной и прочностными характеристиками на формирование взрыва и его последствия не учитываем;

3) влиянием различных видов и назначений ВВ (инициирующие, бризантные, метательные, пиротехнические) пренебрегаем, приняв за эталон один из наиболее распространенных ВВ средней мощности, например, *тротил*;

4) *взрыв ВВ происходит в полукрытом пространстве* на незначительном удалении (полусфера) от земной поверхности (железнодорожный путь);

5) влияние температуры окружающей среды (зима, лето), относительная влажность (дождь, туман), ветер, внешняя поверхность земли, естественные и искусственные препятствия и другие внешние условия не учитываем.

Взрыв заряда ВВ вызывает радиальное (от центра взрыва) движение продуктов взрыва вслед за ударной волной и отрыв от нее на расстоянии  $10 - 14r_0$  ( $r_0$  – приведенный радиус заряда ВВ). В момент отрыва УВ от продуктов взрыва избыточное давление  $\Delta P_\phi$  на фронте волны составляет  $1,5 - 2,0$  МПа, скорость распространения волны детонации  $D = 1100 - 1400$  м/с, скорость потока воздуха за фронтом волны  $UI = 900 - 1100$  м/с. Закономерно установлено, что избыточное давление на фронте ВУВ подчиняется закону подобия, т. е.  $\Delta P_\phi$  не зависит от абсолютных размеров и массы заряда ВВ [5].

На удалении более  $10 - 14r_0$  параметры избыточного давления во фронте ВУВ  $\Delta P_\phi$  для ВВ средней мощности (типа тротил) могут быть определены по формуле проф. Садовского М. А., полученной на основе многочисленных экспериментальных исследований для воздушного взрыва [5], Па:

$$\Delta P_\phi = 7 \frac{q}{R^3} + 2,7 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 0,84 \frac{q^{1/3}}{R}, \quad (1)$$

где  $q$  – вес заряда ВВ, кг;

$R$  – расстояние от центра взрыва, м.

Время действия фазы волны сжатия, с,

$$t_{сж} = 1,5 \sqrt[6]{q} \sqrt{R} \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

В нашем рассматриваемом случае заряд с ВВ находится в вагоне вблизи от земной поверхности. ВУВ распространяется не в полной сфере, а лишь в полусфере (фронт волны соприкасается с поверхностью земли). Наличие вблизи взрыва жесткой преграды в виде земной поверхности только усиливает (отражает) волновую нагрузку. При этом объем воздуха, захватываемый волной, уменьшается в два раза, тем самым увеличивая вдвое величину избыточного давления, рассчитываемого по формуле (1), где вместо величины  $q$  следует подставить  $2q$ :

$$\Delta P_\phi = 14 \frac{q}{R^3} + 4,3 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 1,1 \frac{q^{1/3}}{R}. \quad (3)$$

Тогда время действия фазы волны сжатия для наземного взрыва, с,

$$t_{сж.н.в} = 1,7 \sqrt[6]{q} \sqrt{R} \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

Помимо волновой нагрузки, воздействующей на окружающую среду, образуется воронка разрушений с соответствующими параметрами (глубина, ширина, длина, высота навала грунта), которые можно рассчитать по имеющимся методикам.

В отличие от СЗ широкое применение получили кумулятивные заряды (КЗ). Кумулятивный эффект – это концентрация энергии взрыва в заданном направлении. Предположения об использовании концентрированной энергии взрыва были выдвинуты еще в конце XVIII в. Впервые эффект кумулятивного взрыва был продемонстрирован русским военным инженером генерал-лейтенантом М. Боресковым в 1864 г. с применением заряда ВВ при выполнении саперных работ. Дальнейшее развитие этой идеи нашло практическое применение в разработках Ч. Мунро (США), А. Маршалла (Англия), Макса фон Форстера (Германия) и др. В России серьезным подходом к этому вопросу занимались профессора М. Я. Сухаревский (1923 – 1926 гг.), М. А. Лаврентьев, Г. И. Покровский, Ф. А. Баум, академик АН СССР Е. И. Забабахин и др.

Кумулятивный эффект взрыва, получил широкое применение в военном деле и в народном хозяйстве – при производстве взрывных работ в шахтах, строительстве тоннелей, кана-

лов при направленном перемещении больших масс породы, при резке металла или обжатии труб, при ликвидации завалов в шахтах, заторах рек, льда и т. п.

Рассматривая физику кумулятивного взрыва, следует отметить, что в результате изменения формы зарядов с выемкой можно получить картину перераспределения энергии (концентрацию) взрыва в заданном направлении. Опираясь на основы теории и практики гидродинамики, можно получить явление гидравлического удара, приводящее к перераспределению энергии и повышению скорости движения части сталкивающихся масс [6]. Взрывные газы при взрыве КЗ устремляются в *основной своей массе* перпендикулярно к поверхности выемки, к ее центральной оси (рисунок 3).

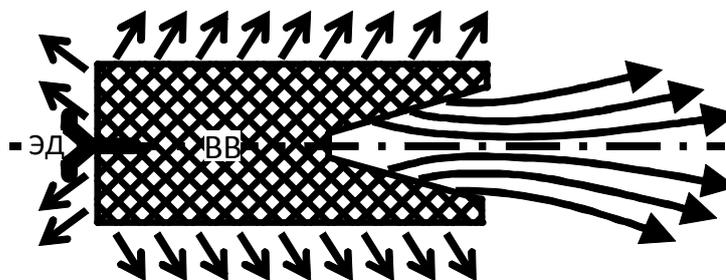


Рисунок 3 – Схема кумуляции взрывных газов

Наибольший эффект кумулятивного взрыва достигается путем устройства заряда цилиндрической формы с внешним покрытием оболочки и выемки металлом (сталь, медь). Внутренняя часть заряда представляет собой металлическую трубку. В торце заряда под трубкой расположены инертная прокладка и детонатор. При взрыве детонационная волна огибают инертную прокладку и одновременно сжимает металлический цилиндр со всех сторон, создавая при этом давление более 10000 МПа. Давление продолжает нарастать до момента, когда происходит полное раздавливание цилиндра и частицы цилиндра сталкиваются друг с другом в направлении к его оси и в какой-то момент останавливаются, создавая тем самым громадное давление и «выплескивают» его совместно с деформированной металлической струей в осевом направлении от заряда. Достаточно высокая эффективность кумуляции достигается лишь в тех случаях, когда выемка имеет металлическую облицовку. Давление во фронте ударной волны при подрыве КЗ в 1,8 – 1,9 раза больше по сравнению с аналогичным зарядом ВВ, но при взрыве в воздухе.

Если выемка заряда ВВ *коническая* и ее образующие составляют угол  $\alpha$  с осью выемки, то начальная скорость центра тяжести кумулятивной струи

$$V_k = V_0 \left( \frac{1}{\sin(\alpha + \phi)} + \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \phi)} \right), \quad (5)$$

где  $V_0$  – начальная скорость облицовки при взрыве;

$\phi$  – угол между направлением движения металлической облицовки и нормали к ее поверхности.

Согласно экспериментальным результатам можно прогнозировать, что при толщине облицовки, равной 1/30 диаметра кумулятивной выемки,  $V_0$  может составлять около 2000 м/с.

Кумулятивная струя, образованная при взрыве заряда ВВ с конической выемкой, в начале своего движения имеет длину, равную длине образующей выемки. Последующее движение вытягивает струю до максимальной длины на расстоянии от заряда, равном примерно одному – двум диаметрам выемки. Далее фокусного расстояния струя дробится на мелкие осколки, сгорающие в воздухе вследствие высокой скорости движения.

Для зарядов ВВ с *полусферической* выемкой кумулятивные струи имеют меньшие скорость и длину, но они более эффективны на значительных расстояниях.

Для реальных условий перевозки ВВ и его размещения в вагонах наиболее близким по конструкции заряда можно считать КЗ с конической или полусферической выемкой, не покрытой оболочкой (рисунок 4).

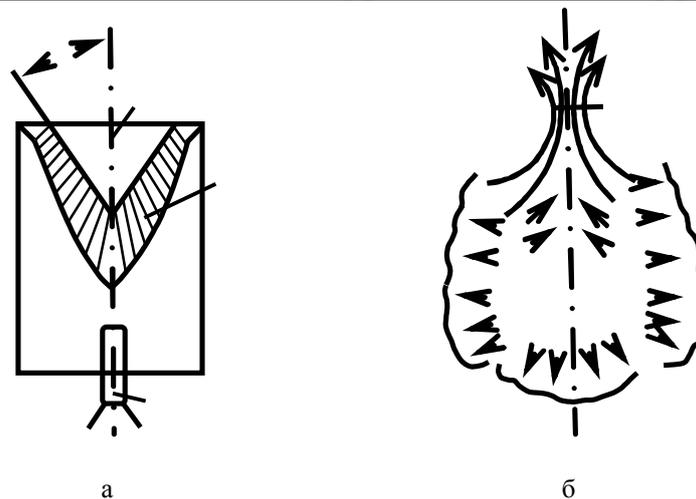


Рисунок 4 – КЗ без оболочки. Формирование начальной стадии взрыва

При взрыве волна детонации движется вдоль образующей оси выемки при условии инициирования взрыва в точке, находящейся на оси заряда (см. рисунок 4). Продукты взрыва, движущиеся внутри выемки, сходятся около оси и меняют направление своего движения. Часть продуктов взрыва из выемки с повышенной скоростью, а другая – тормозясь, под действием реакции выбрасываемой струи выбрасывается из выемки с незначительной скоростью.

Часть заряда ВВ, прилегающая к выемке, при взрыве образует газы, направленные внутрь этой выемки. Эта часть заряда называется «непосредственно кумулирующей» и отделена от остальной массы заряда ВВ границей, равноотстоящей как от поверхности выемки, так и от внешней поверхности заряда и по сравнению с общим объемом заряда невелика. Газовая кумулятивная струя сразу же после своего образования выходит за пределы выемки и быстро рассеивается в результате расширения под действием повышенного давления внутри струи (см. рисунок 4).

Скорость распространения продуктов детонации в кумулятивной струе для обоих выемок и без металлической оболочки можно приближенно определить из теории гидродинамической кумуляции. В зарядах ВВ с выемкой и отсутствием металлической оболочки отмечается некоторое повышение скорости взрывных газов и давления на преграду, пропорциональное квадрату скорости. В данном случае давление может увеличиться на 25 %.

Разлетающиеся от места взрыва осколки оболочки снарядов, предметов опасны для человека и могут вызвать детонацию зарядов ВВ или легковоспламеняющихся материалов (цистерны с горючими материалами) в случаях, если скорость осколков составляют более 1500 м/с. Скорость разлета осколков может быть определена по формуле, составленной на основе многочисленных опытов [5]:

$$V_{\text{оск}} = 2500 - \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{M_{\text{об}}}{M_{\text{ВВ}}}}} - a, \quad (6)$$

где  $M_{\text{об}}$  и  $M_{\text{ВВ}}$  – вес оболочки и заряда ВВ соответственно;

$a$  – безразмерная величина, зависящая от материала оболочки (для стали  $a = 0,05$ , для иных, менее прочных материалов  $a = 0,02$  и менее).

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные профессором М. А. Садовским [6], академиком Ю. Б. Харитоновом и другими авторами, подтверждают существенное

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

влияние формы и размеров зарядов ВВ на импульс взрыва и на количество движения – количественную характеристику параметров взрыва.

Таким образом, учитывая в практике явление кумуляции, можно даже управлять действием случайного (несанкционированного) взрыва путем подбора формы и размеров заряда, внешней облицовки и места его инициирования. Явление это учитывалось при проектировании стационарных складов хранения ВВ и боеприпасов, чтобы произвести расчеты по определению минимального безопасного расстояния между сооружениями-хранилищами.

Размещение в вагонах ВВ в упаковках, близких по форме к КЗ удлиненной или сосредоточенной формы, с наличием постоянной внешней (и, по возможности, внутренней разделительной) металлической облицовки позволит уменьшить возможные прогнозируемые разрушения от случайных взрывов. Сокращение площади опирания упаковок с ВВ в вагоне (придание в основании закругленной или конической формы) (рисунок 5) и наличие опорной промежуточной инертной прокладки в основании упаковки (тары) с аварийным детонатором позволит спрогнозировать основное направление энергии возможного взрыва в сторону, противоположную железнодорожному полотну.

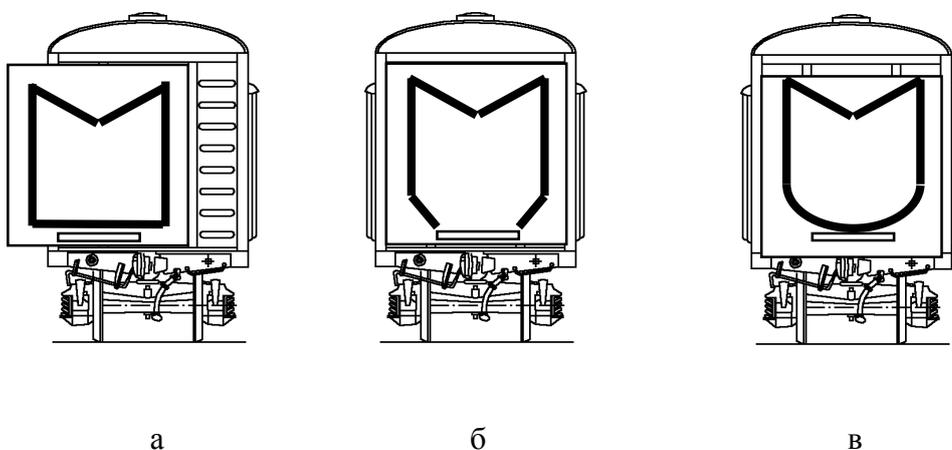


Рисунок 5 – Предполагаемая форма перевозки ВВ в железнодорожных вагонах

Детонатор, расположенный под инертной прокладкой, автоматически подрывает перевозимое ВВ в случае возникновения ситуации передачи детонации случайного взрыва (например, при пожаре). При этом предполагается разделение всего объема вагона на отдельные места-хранилища, локализирующие общий взрыв на отдельные очаги и исключаящие передачу детонации взрыва.

## Список литературы

1. Субботин, А. И. О технической политике по повышению безопасности перевозок взрывчатых материалов промышленного назначения [Текст] / А. И. Субботин // Журнал-каталог «Транспортная безопасность и технологии». 2004. – № 3. – С. 12 – 14.
2. Слюсарь, Н. Н. Управление экологическими рисками транспортировки взрывчатых веществ железнодорожным транспортом [Текст]: Дис... канд. техн. наук. Пермь, 2004. – 149 с.
3. Взрывные явления. Оценка и последствия [Текст] / Под ред. акад. Я. Б. Зельдовича, Б. Е. Гельфанда. – М.: Мир, 1986. – 319 с.
4. Турута, Н. У. Взрыв и его мирные профессии [Текст] / Н. У. Турута, И. А. Лучко, В. А. Поплавский. Киев: Наукова думка, 1982. – 176 с.
5. Покровский, Г. И. Взрыв [Текст] / Г. И. Покровский. – М.: Недра, 1980. – 190 с.
6. Похил, П. Ф. Импульс взрыва и его зависимость от формы и размеров заряда и свойств ВВ [Текст] / П. Ф. Похил, М. А. Садовский // Механическое действие взрыва / – М., 1994. – С. 103 – 115.

УДК 621.332

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ С УЧЕТОМ ОТРЫВОВ ПОЛОЗА ОТ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА

**Аркашев Александр Евгеньевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Тел.: 8-913-617-68-02.

E-mail: arkaleks@yandex.ru

**Ларькин Иван Валерьевич**

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: 8-913-644-25-22.

E-mail: larkin@mir-omsk.ru

*В статье рассматривается модель взаимодействия токоприемника и контактной подвески с учетом отрывов полоза от контактного провода. Для уменьшения коэффициента отрывов предлагается оснастить токоприемник системой автоматического регулирования (САР) нажатия, содержащей датчик искрения.*

Ключевые слова: *моделирование, токоприемник, контактная подвеска, отрыв, регулирование, контактное нажатие.*

## SIMULATION BETWEEN PANTOGRAPH AND CATENARY WITH CONSIDERATION OF PANHEAD SEPARATIONS FROM CONTACT WIRE

**Arkashev Alexandr Evgenevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., lecturer of chair «Power Supply for Railway Transport».

Phone: 8-913-617-68-02.

E-mail: arkaleks@yandex.ru

**Larkin Ivan Valerevich**

The post-graduate student of chair «Power Supply for Railway Transport», OSTU.

Phone: 8-913-644-25-22.

E-mail: larkin@mir-omsk.ru

*In this article reviewed the model of pantograph and catenary interaction with consideration of panhead separations from contact wire. To reduce the separation coefficient pantograph with the automatic control system (ACS) of pantograph force and arcing sensor is offered.*

Keywords: *simulation, pantograph, catenary, separation, control, contact force.*

УДК 621.332.531

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ С КОНТАКТНЫМИ ПОДВЕСКАМИ НА ВОЗДУШНЫХ СТРЕЛКАХ

**Жмудь Давид Дмитриевич**

Омский техникум железнодорожного транспорта – филиал ОмГУПСа.

644020, г. Омск, ул. Академика Павлова, 24.

Преподаватель спецдисциплин.

Тел.: 44-38-12.

**Королев Виктор Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Тел.: (3812) 31-34-46.

*В статье рассмотрена методика расчета взаимодействия токоприемников с контактными подвесками на усовершенствованных воздушных стрелках контактной сети. Изложенная методика и разработанная программа позволяют на стадии проектирования прогнозировать характер взаимодействия при различных значениях параметров системы.*

Ключевые слова: воздушная стрелка контактной сети, модели контактных подвесок, режимы взаимодействия, сила контактного нажатия.

## INTERPLAU CALCULATION METHOD OF THE PANTOGRAPH WITH OVERHEAD CONTACT SUSPENDERS ON VOLTAGE FLUCTUATION

**Zhmud David Dmitrievich**

Omsk technical school of a railway transportation – branch OSTU.

24, Academician Pavlova, Omsk, 644020, Russia.

The teacher special disciplines.

Phone: 44-38-12.

**Korolev Victor Aleksandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech. Sci, the senior lecturer of chair «Power supply of Railroad Transport».

Phone: (3812) 31-34-46.

*In this article the calculation method of the pantograph interplau with contact suspenders on modernized overhead lines voltage fluctuation is researched. The method and programme given below lets prognosis the charecot of interplauing by different meaninos of the system forms, ou the stage of projecting.*

Keywords: voltage fluctuation, types of overhead contact suspenders, uterplau regimes, contact pressure power.

УДК 629.4.0267.4: 51.74

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕМОНТА КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВЗОВ ВЛ10 МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### **Исмаилов Шафигула Калимуллович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».

Тел.: 8-913-628-33-05.

E-mail: IsmailovShK@omgups.ru

### **Гателюк Олег Владимирович**

Кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: 8-906-918-56-17.

E-mail: GateljukOV@omgups.ru

### **Талызин Александр Сергеевич**

Омский техникум железнодорожного транспорта – филиал ОмГУПСа.  
644020, г. Омск, ул. Академика Павлова, 24.

Директор.

Тел.: 8-905-098-63-10.

E-mail: TalyzinAS@omgups.ru

*В статье рассматривается возможность исследования методом имитационного моделирования процесса ремонта колесных пар электровозов ВЛ10, работающих корпоративным парком на полигоне нескольких железных дорог.*

Ключевые слова: электровоз, колесная пара, ремонт, имитационное моделирование.

## RESEARCH OF PROCESS OF REPAIR OF WHEEL PAIRS ELECTRIC LOCOMOTIVES VL10 BY THE METHOD OF IMITATING MODELLING

### **Ismailov Shafigula Kalimullovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr.Sci.Tech., the professor of chair «Rolling stock of electric railways».

Phone: 8-913-628-33-05.

E-mail: IsmailovShK@omgups.ru

### **Gateljuk Oleg Vladimirovich**

Cand.PM.Sci., the senior lecturer of chair «Higher mathematics», OSTU.

Phone: 8-906-918-56-17.

E-mail: GateljukOV@omgups.ru

### **Talyzin Alexander Sergeevich**

Omsk technical school of a railway transportation – branch OSTU.

24, Academician Pavlova, Omsk, 644020, Russia.

Director.  
Phone: 8- 905-098-63-10.  
E-mail: TalyzinAS@omgups.ru

*In article possibility of research is considered by a method of imitating modeling of process of repair of wheel pairs electric locomotives VL10 working as corporate park on range of several railways.*

*Keywords: the Electric locomotive, wheel pair, repair, imitating modeling.*

УДК 629.4.015

## **КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗУБЧАТЫХ КОЛЕСАХ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА ЭЛЕКТРОВОЗА**

**Кузнецов Виктор Федорович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика».

**Шантаренко Сергей Георгиевич**

Доктор технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской части (НИЧ), заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-27.

E-mail: nich@omgups.ru

**Пономарев Евгений Владимирович**

Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-27.

E-mail: PonomarevEV@omgups.ru

*В статье представлены результаты математического моделирования расчета зубчатых колес тягового редуктора, которые позволят дать оценку окружной силы и контактного напряжения в середине области контакта зубьев шестерни и зубчатого колеса тягового редуктора колесно-моторного блока с опорно-осевым подвешиванием тягового электродвигателя, возникающих от действия крутящего момента на валу якоря тягового электродвигателя, а также упругой силы и контактных напряжений, возникающих от импульсного воздействия при прохождении стыковых неровностей пути.*

*Ключевые слова: колесно-моторный блок; тяговый электродвигатель; тяговый редуктор; зубчатые колеса; упругая сила; окружная сила; контактные напряжения.*

## **CONTACT PRESSURE IN COGWHEELS OF THE TRACTION REDUCER WHEEL-MOTOR OF THE BLOCK OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE**

**Kuznetsov Victor Fedorovich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Higher mathematics»

## **Shantarenko Sergey Georgievich**

Dr.Sci.Tech., docent, the chief of a research part (NICH), managing chair «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-27.

E-mail: nich@omgups.ru

## **Ponomarev Evgenie Vladimirovich**

The post-graduate student of chair «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-27.

E-mail: PonomarevEV@omgups.ru

*In article results of mathematical modeling of calculation of cogwheels of a traction reducer which will allow to state an estimation to district force and contact pressure in the middle of area of contact of teeth of a gear wheel and a cogwheel of a traction reducer a wheel-motor of the block with the oporno-axial suspension of the traction electric motor arising from action twisting moment on a shaft of an anchor of the traction electric motor and as - to elastic force and the contact pressure arising from pulse influence at passage of butt roughnesses are presented.*

*Keywords: wheel-motor the block; the traction electric motor; a traction reducer; cogwheels; elastic force; district force; contact pressure.*

УДК 621.313

## **ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ УДАРНО-АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

### **Петроченко Сергей Валерьевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

Тел.: (3812) 31-18-11.

E-mail: s.o.r.d.84@mail.ru

### **Федоров Алексей Аркадьевич**

644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Технология машиностроения».

Тел.: (3812) 65-24-18, (3812) 65-35-84.

E-mail: aafedorov83@rambler.ru

*В статье рассмотрена сущность ударно-акустической обработки (УАО) коллекторов электрических машин постоянного тока (ЭПТ), представлена схема установки для УАО ЭПТ, рассчитаны режимы для УАО коллектора тягового электродвигателя ТЛ-2К1, приведены результаты исследований поверхности коллектора после УАО на наличие политуры, улучшающей коммутацию МПТ, сделаны выводы о целесообразности использования метода УАО для окончательной обработки коллекторов МПТ в условиях локомотиворемонтных депо.*

Ключевые слова: *электрическая машина постоянного тока, коллектор, ударно-акустическая обработка.*

## **SURFACE HARDENING OF THE ACTING FACE DIRECT CURRENT ELECTROMOTOR COMMUTATORS BY THE SHOCK-ACOUSTIC TREATMENT METHOD**

**Petrochenko Sergey Valerevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The teacher of chair «Technology of transport mechanical engineering and rolling stock repair».

Phone: (3812) 31-18-11.

E-mail: c.o.r.d.84@mail.ru

**Fedorov Alexey Arkadevich**

Omsk State Technical University (OmSTU).  
11, World av., Omsk, 644050, Russia.

Cand.Tech.Sci., the teacher of chair «Technology of mechanical engineering», OmSTU.

Phone: (3812) 65-24-18, (3812) 65-35-84.

E-mail: aafedorov83@rambler.ru

*In article the entity of the shock-acoustic treatment (SAT) of the direct current electromotor commutators are considered, the diagram of the device for SAT are presented, the treatment parameters for traction motor TL-2K1 are calculated, the results of the polish liquid for the commutation improvement availability researches are presented, the conclusions of the SAT application as final polishing in locomotive depot expedient are concluded.*

Keywords: *direct current electromotor, commutator, shock-acoustic treatment.*

УДК 621.332

## **РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТОКОСЪЕМА С ПОМОЩЬЮ АССОЦИАТИВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**Сидоров Олег Алексеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Тел.: (3812) 31-34-46.

**Смердин Александр Николаевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: 8-904-588-40-48.

E-mail: smerdinan@omgups.ru

**Жданов Вячеслав Александрович**

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: 8-908-108-30-33.

E-mail: jdanovva@omgups.ru

*В статье рассмотрены основные направления совершенствования методов оценки качества токосъема, основанные на определении интегральных показателей. Предложена методика расчета среднеквадратического отклонения контактного нажатия без измерительного токоприемника на основе ассоциативной экспертной искусственной нейронной сети, приведены алгоритмы понижения размерности входного вектора нейросетевой модели и поиска оптимальной архитектуры нейронной сети-эксперта.*

Ключевые слова: *контактное нажатие, токоприемник, нейронная сеть, перцептрон, алгоритм обучения, понижение размерности, архитектура сети.*

## ESTIMATION OF INTEGRAL CURRENT COLLECTION QUALITY FACTORS USING EXPERT ASSOCIATIVE NEURAL NETWORKS

### **Sidorov Oleg Alekseevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia

Dr. Tech. Sci., professor, head of chair «Power Supply for Railway Transport».

Phone: (3812) 31-34-46.

### **Smerdin Alexandr Nikolaevich**

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of chair «Power Supply for Railway Transport», OSTU.

Phone: 8-904-588-40-48.

E-mail: smerdinan@omgups.ru

### **Jdanov Vyacheslav Alexandrovich**

The post-graduate student of chair «Power Supply for Railway Transport», OSTU.

Phone: 8-908-108-30-33.

E-mail: jdanovva@omgups.ru

*In this article reviewed basic solutions for current collection quality estimation methods improvement based on integral factors calculation. Contact force mean square deviation calculation method without using special pantograph & based on associative expert artificial neural network is proposed, algorithms for neural network – expert input vector dimension reduction & neural network optimal architecture finding are represented.*

Keywords: *contact force, pantograph, neural network, perceptron, learning algorithm, dimension reduction, network architecture.*

УДК 621.336.7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА МОНОРЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

### **Ступаков Сергей Анатольевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-46, факс: (3812) 44-28-31.

E-mail: stupakov1@yandex.ru

**Филиппов Виктор Михайлович**

Аспирант, ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-46, факс: (3812) 44-28-31.

*В статье представлены результаты моделирования износа контактных пар устройств токосъема на основании экспериментальных исследований и расчета. Выполнено прогнозирование износа элементов системы токосъема монорельсового электрического транспорта.*

Ключевые слова: *монорельсовый транспорт, устройства токосъема, износ, износосталостные испытания, моделирование, математическая модель, прогнозирование износа.*

## THE SIMULATION OF WEAR OF CONTACT PAIRS OF CURRENT COLLECTION DEVICES OF MONORAIL ELECTRIC VEHICLES

**Stupakov Sergey Anatolevich**

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-46, fax: (3812) 44-28-31.

E-mail: stupakov1@yandex.ru

**Philippov Victor Mihajlovich**

The post-graduate student, OSTU.

Phone: (3812) 31-34-46, fax: (3812) 44-28-31.

*In the article are presented the results of the simulation of wear of contact pairs of devices based on the current collection of experimental research and calculation. Done prediction of wear elements of current collection monorail electric vehicles.*

Keywords: *monorail transport, current collector units, wear, weariness tests, modeling, mathematical model, forecasting of wear.*

УДК 621.313

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИБОРА ПКК-5М

**Харламов Виктор Васильевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

Тел.: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

**Шкодун Павел Константинович**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@mail.ru

**Афонин Александр Петрович**

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

*В статье представлены результаты математической обработки экспериментальных данных коммутационных испытаний машины постоянного тока серии 2П, на основании которых установлен набор диагностических параметров, позволяющих проводить диагностирование с большей достоверностью. С помощью усовершенствованного прибора контроля качества коммутации ПКК-5М проведены экспериментальные исследования в соответствии с составленным планом полного факторного эксперимента. В итоге для электрической машины серии 2П получены уравнения регрессии среднего уровня искрения и среднего квадратичного отклонения интенсивности искрения по коллектору и во времени для режимов пере- и недокоммутации.*

Ключевые слова: коллекторный электродвигатель, коммутация, интенсивность искрения, диагностирование, воздействующий фактор.

## APPLICATION DEVICE PKK-5M FOR COMMUTATION CONDITION DIAGNOSTIC OF DC MOTORS

**Harlamov Victor Vasilevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx Av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of department «Electrical machines and common electrotechnic».

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@mail.ru.

**Shkodun Pavel Konstantinovich**

Cand.Tech.Sci., senior lecturer of department «Electrical machines and common electrotechnic», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@mail.ru.

**Afonin Aleksandr Petrovich**

Post-graduate student of department «Electrical machines and common electrotechnic», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@mail.ru.

*In article results of mathematical processing of experimental data of commutation tests of the DC motor of a constant current are submitted with the purpose of definition of the diagnostic parameters, allowing to raise reliability of diagnosing of a condition of commutation of the DC motor. The device of quality assurance of commutation PKK-5M is offered. The block diagram of experimental installation for carrying out of researches under the experimental design techniques is submitted. The equations of regression of an average level sparking DC motor, an mean square deviation of intensity sparking on a collector and an mean square deviation in time both for re-commutation and for subcommutation are received.*

Keywords: DC motor, commutation, sparking intensity, the diagnosing, the influencing factor.

УДК 621.331:621.311.4

## СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В МОМЕНТЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

**Карabanov Максим Александрович**

Дорожная электротехническая лаборатория Западно-Сибирской железной дороги (ДЭЛ ЗСЖД).

644020, г. Омск, ул. Леконта, 20.

Электромеханик Дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ ЗСЖД).

Тел.: (3812) 44-27-61, 8-905-099-47-41.

E-mail: zmax04@mail.ru

*В статье рассматривается проблема провалов напряжения на шинах 10 и 0,4 кВ при подключении преобразовательных агрегатов. Установлено, что в ряде случаев провалы напряжения превышали 30 % и что обусловлены они броском тока включения в тяговом трансформаторе, кратность которого составляла  $5I_{ном}$ .*

*С целью минимизации бросков тока включения было выполнено математическое моделирование бросков тока при включении однофазного и тягового трехфазного трансформаторов с учетом нелинейной характеристики намагничивания стали магнитопровода, в результате которого установлено, что величина броска тока зависит от сочетания углов отключения и включения относительно синусоиды опорного напряжения.*

*На основе полученной зависимости было изготовлено устройство синхронного включения тягового трансформатора, за счет использования которого на действующей тяговой подстанции Западно-Сибирской железной дороги удалось существенно снизить броски тока включения и тем самым значительно повысить качество электрической энергии питания нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях.*

Ключевые слова: бросок тока включения, провал напряжения, преобразовательный агрегат, тяговый трансформатор, нетяговые потребители, математическое моделирование, устройство синхронного включения тягового трансформатора.

## REDUCTION OF THE INFLUENCE OF SYSTEM OF THE TRACTION ELECTRICAL SUPPLY ON POWER SUPPLIES OF NON-TRACTION CONSUMERS IN THE MOMENT OF CONNECTION RECTIFIER UNITS

**Karabanov Maxim Alexandrovich**

Electrotechnical laboratory of Western Siberian railway.

20, Lekonta st., Omsk, 644020, Russia.

Electrician of electrotechnical laboratory of Western Siberian railway.

Phone: (3812) 44-27-61, 8-905-099-47-41.

E-mail: zmax04@mail.ru

*The problem of brownouts on the bus leads 10 and 0,4 kV in the connection moment of rectifier units was considered to the article. Found that, in some cases its exceeded 30% and were due to bumps connection in the traction-feeding transformer, which was in such moments  $5I_{nom}$ .*

*For the purpose of minimization of bumps has been executed mathematical modeling of bumps at inclusion single-phase and traction three-phase transformers taking into account the nonlinear characteristic of magnetization of magnetic conductor steel. As a result of modeling it is established*

*that the magnitude of bump depends on a combination of angles of switching-off and inclusion concerning a sinusoid of basic voltage.*

*On the basis of the received dependence it has been made device of synchronous inclusion of the traction transformer through the use of which on operating traction substation of the Western-Siberian railway could substantially reduce bumps of inclusion. As a result, was succeeding increase power quality Non-traction consumers at moments of connecting the rectifier unit to the traction substation.*

Keywords: *bump, brownout, Rectifier unit, traction-feeding transformer, Non-traction customers, mathematical simulation, device of synchronous switching traction-feeding transformer.*

УДК 621.332.3:621.315.66

## **СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ ЯЧЕЙКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОПОРЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

**Протченко Алексей Викторович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Системы передачи информации».

Тел.: 8-951-421-98-04.

E-mail: tverdyata@gmail.com

**Мухин Валерий Анатольевич**

Омский государственный университет.

644053, г. Омск, ул. Нефтезаводская, 11.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Неорганическая химия».

Тел.: (3812)-64-46-59.

E-mail: mukhin@univer.omsk.su

*В статье рассмотрена усовершенствованная схема замещения коррозионной ячейки железобетонной опоры контактной сети, предложены способ практического расчета описанных в теоретической электрохимии параметров коррозионной ячейки и система дифференциальных уравнений, описывающая электрохимические процессы в железобетонной опоре.*

Ключевые слова: *железобетонная опора контактной сети, коррозия, схема замещения, физическая модель, электрохимический процесс, ток утечки, нелинейность.*

## **EQUIVALENT CIRCUIT OF THE CORROSION CELL OF THE FERRO- CONCRETE SUPPORT OF THE CONTACT NETWORK**

**Protchenko Alexey Viktorovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx Av., Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of chair «Information transfer system».

Phone: 8-951-421-98-04.

E-mail: tverdyata@gmail.com

**Mukhin Valery Anatolevich**

Omsk State University.

11, Petrofactory, Omsk, 644053, Russia.

Cand.Tech.Sci., the professor of chair «Inorganic hi-mija».

Phone: 8 (3812)-64-46-59.

E-mail: mukhin@univer.omsk.su

*The improved equivalent circuit of the corrosion cell of the concrete railway poles is described at this article. The method of the practical calculating of the parameters of the corrosion cell described in theoretical electrochemistry has been proposed and system of the differential equations describing electrochemical processes in the pole has also been described.*

*Keywords: concrete railway pole, corrosion, equivalent circuit, physical model, electrochemical process, leakage current, non-linearity.*

УДК 629.4

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**Сидорова Елена Анатольевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: 31-18-66.

E-mail: Armsid@mail.ru

**Давыдов Алексей Игоревич**

Аспирант кафедры «Прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Phone: 8-906-990-93-84.

E-mail: DavydovAI@bk.ru

*В статье рассмотрены основные элементы анализа эффективности применения рекуперативного торможения при проведении энергетического обследования объектов железнодорожного транспорта.*

*Ключевые слова: рекуперативное торможение, энергетическое обследование, энергоэффективность.*

## **ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF REGENERATIVE BRAKING ENERGY DURING A SURVEY OF RAILWAY TRANSPORT OBJECTS**

**Sidorova Elena Anatolevna**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci.Tech., professor of the chair « Applied Mathematics and Mechanics».

Phone: 31-18-66.

E-mail: Armsid@mail.ru

**Davydov Alexey Igorevich**

Postgraduate student of the chair «Applied Mathematics and Mechanics», OSTU.

Phone: 8-906-990-93-84.

E-mail: DavydovAI@bk.ru

*The article describes the main elements on the effectiveness of regenerative braking energy during a survey of railway transport objects.*

Keywords: *recovery, energy audits, energy efficiency.*

УДК 658.567.1

## СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

**Шерстобитов Михаил Сергеевич**

Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: 8-904-581-07-10.

E-mail: miheyomgups@mail.ru

**Лебедев Виталий Матвеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика».

Тел.: (3812) 31-06-23.

*Статья посвящена рассмотрению проблемы утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) в городах с большой плотностью населения и анализу существующих путей решения данной проблемы. К основным способам утилизации ТБО относятся складирование отходов на полигонах, комплексная сортировка с переработкой выделенных компонентов, биотермическое компостирование, мусоросжигание. Из перечисленных вариантов обезвреживания ТБО особое внимание уделено сжиганию отходов на колосниковой решетке с наклонно-переталкивающим механизмом.*

Ключевые слова: *твердые бытовые отходы, мусоросжигание, складирование, биотермическое компостирование, процесс сжигания, продукты сгорания, выработка тепловой энергии, вредные выбросы, котел.*

## FIRM HOUSEHOLD WASTE PROBLEMS AND RECYCLING WAYS

**Sherstobitov Michael Sergeevich**

The post-graduate student of chair «Power system», OSTU.

Phone: 8-904-581-07-10.

E-mail: miheyomgups@mail.ru

**Lebedev Vitaly Matveevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr.Sci.Tech., professor of the chair «Power system».

Phone: (3812) 31-06-23.

*Article is devoted consideration of a problem of recycling of a firm household waste in cities with the big population density and to the analysis of existing ways of the decision of the given problem. The basic ways of recycling of a firm household waste concern: warehousing of a waste on ranges, complex sorting with processing of the allocated components, a biothermal composting, burning. From the variants of neutralization of a firm household waste set forth above, the special attention is given burning of a waste on a grid-iron lattice with in the leaning position-push mechanism.*

Keywords: *a firm household waste, burning, warehousing, a biothermal composting, burning process, combustion products, thermal energy development, harmful emissions, a copper.*

УДК 621.396.6

## ПОДБОР ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ OFDM-СИГНАЛОВ

**Панюков Алексей Геннадьевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Системы передачи информации».

Тел.: 8-904-589-71-43.

E-mail: panukov\_ag@mail.ru

*Для обеспечения качественной радиосвязи в диапазоне частот 2,4 ГГц с применением OFDM-сигналов была разработана схема устройства предварительной обработки сигналов. Для построения схемы устройства был проведен подбор электронных компонентов, отвечающих требованиям, сформулированным в статье.*

Ключевые слова: *радиоприемное устройство, электронные компоненты, OFDM-сигнал.*

## SELECTION OF ELECTRONIC COMPONENTS FOR OFDM-SIGNALS PRE-PROCESSING UNIT

**Panyukov Aleksey Gennadivich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student of the chair «Information transfer systems».

Phone: 8-904-589-71-43.

E-mail: panukov\_ag@mail.ru

*Device for the signals pre-processing has been developed to ensure high-quality radio in the 2.4GHz band. Device receives OFDM signals. Selection of electronic components was carried out. All used components meet the requirements set out in the work.*

Keywords: *radio receiver, electronic components, OFDM-signal.*

УДК 621.332.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ОПОРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ СТОЕК

**Запрудский Александр Алексеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Тел.: (3812) 42-00-70, 8-903-983-90-59.

E-mail: palmuser@yandex.ru

*В статье рассмотрена предложенная методика определения момента трещинообразования и жесткости по высоте опоры. Для этого была разработана расчетная схема коль-*

цевого сечения опоры, определены усилия в бетоне и арматуре. Предложена методика определения перемещения стойки под нагрузкой, определены дополнительные изгибающие моменты, обусловленные прогибом стойки.

Ключевые слова: железобетон, жесткость, арматура, напряжение, внешние нагрузки, изгибающий момент, внутренние усилия, прогиб.

## DEFINITION OF LOADINGS ON POLES OF THE CONTACT NETWORK TAKING INTO ACCOUNT DEFORMATION OF RACKS

**Zaprudsky Alexander Alexeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of chair «Power supply for railways».

Phone: (3812) 42-00-70, 8-903-983-90-59.

E-mail: palmuser@yandex.ru

*In article the offered technique of definition of the moment appear of cracks and rigidity on support height is considered. For this purpose the equivalent scheme of protective concrete layer has been developed, efforts in concrete and armature are defined. The technique of definition of movings of a rack under loading is offered, the additional bending moments caused by a deflection of a rack are defined.*

Keywords: *ferroconcrete, rigidity, armature, tension, external loadings, bending moment, internal efforts, sag.*

УДК 351.86: 656.2

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Поздеев Василий Васильевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Начертательная геометрия и инженерная графика».

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: PozdeevVV@omgups.ru

**Крайнов Василий Васильевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

Email: KrainovVV@omgups.ru

*Рассмотрена модель аварийного взрыва при транспортировке взрывчатых веществ (ВВ) на железнодорожном транспорте. С целью уменьшения зоны поражения окружающих объектов от возникших ударных волн при взрыве предлагается изменить форму транспортировки ВВ в вагоне в виде кумулятивных зарядов. При этом основная часть энергии взрыва будет направлена в сторону, противоположную железнодорожному полотну вверх по направлению кумулятивной выемки заряда ВВ.*

Ключевые слова: защита, аварийный взрыв, поражающие факторы, кумуляция, форма заряда, эффект кумулятивного взрыва, перераспределение нагрузки, форма перевозки взрывчатых веществ.

## TO THE QUESTION OF INCREASE OF EXPLOSION SAFETY AT TO TRANSPORTATION OF EXPLOSIVES ON THE RAILWAY TRANSPORTATION

### **Pozdeev Vasily Vasilievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., lecturer of chair «Descriptive geometry and engineering drawing».

Phone: (3218) 31-18-27.

E-mail: PozdeevVV@omgups.ru

### **Krainov Vasily Vasilievich**

Cand.Tech.Sci., lecturer of chair « Heat-and-power engineering», OSTU.

Phone: (3218) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

*A model of emergency explosion while transporting explosives on railway is considered. To reduce a strike area of surrounding objects by appearing air-blasts from explosion it is proposed to transport explosives in a form of hollow charges. By this way the most part of explosion power will be have direction opposite to groundwork, up in one direction with cumulative hollow of explosive charge.*

Keywords: protection, emergency explosion, strike factors, cumulating, charge form, cumulative explosion effect, load transfer, explosives transporting method

## Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать редактору журнала Михалевой Светлане Сергеевне по электронной почте: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

### Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

#### В редакцию представляются:

текст статьи на белой бумаге формата А4 в 2 экз., а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

название статьи, аннотация, ключевые слова, название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи);

один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами.

#### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм); размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавита, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов, необходимо обращаться в редакцию.

Редколлегия оставляет за собой право литературной редакции содержания статьи без согласования с авторами.

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Авилов Валерий Дмитриевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Бородин Анатолий Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Ведрученко Виктор Родионович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Горюнов Владимир Николаевич – д.т.н., ОмГТУ (Омск);  
Гончар Игорь Иванович – д.ф.-м.н., ОмГУПС (Омск);  
Демин Юрий Васильевич – д.т.н., НГАВТ (Новосибирск);  
Ермоленко Дмитрий Владимирович – д.т.н., ВНИИЖТ (Москва);  
Исмаилов Шафигула Калимуллович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Кандаев Василий Андреевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Костюков Владимир Николаевич – д.т.н., НПЦ «Динамика» (Омск);  
Кузнецов Андрей Альбертович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Лебедев Виталий Матвеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Маслов Геннадий Петрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Медведев Владимир Ильич – д.т.н., СГУПС (Новосибирск);  
Митрохин Валерий Евгеньевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Мочалин Сергей Михайлович – д.т.н., СибАДИ (Омск);  
Нехаев Виктор Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Николаев Виктор Александрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Овчаренко Сергей Михайлович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Парамонов Александр Михайлович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Рауба Александр Александрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Сафронов Эдуард Алексеевич – д.т.н., СибАДИ (Омск);  
Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Сидорова Елена Анатольевна – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Сковородников Евгений Иванович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., ОмГУПС (Омск).

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Михалева С. С.

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» – 66087.

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;  
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 20.09.2011.

Тираж 500 экз.

Распространяется бесплатно.

