

научно-технический

журнал

# ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 3(3)  
2010

Юбилейный выпуск, посвященный 110-летию  
Омского государственного университета путей сообщения



## **К 110-летию Омского государственного университета путей сообщения**



**Уважаемые читатели!**

В 2010 году исполняется 110 лет со дня основания Омского государственного университета путей сообщения – одного из ведущих вузов России, находящегося в ведении Федерального агентства железнодорожного транспорта. Университет обеспечивает высококачественную подготовку бакалавров, дипломированных специалистов, магистров, аспирантов и докторантов. Вуз обладает высоким научно-педагогическим потенциалом, располагает мощной и самой современной материально-технической базой, богатым библиотечным комплексом. Инновационные разработки ученых университета успешно используются на железных дорогах страны.

Научные исследования ведутся в области надежности и обслуживания подвижного состава, электрификации, повышения скоростей движения, энергосбережения, качества электрической энергии, связи и сигнализации, централизации и блокировки, экономики железных дорог, систем передачи информации, разработки элементов перспективных видов монорельсового транспорта.

Сегодня университет – один из ведущих разработчиков на железнодорожном транспорте в области диагностики технических средств; технологии восстановления и ремонта деталей и узлов подвижного состава; электрической тяги; электроснабжения и токосъема, ресурсо- и энергосберегающих технологий и оборудования и др.

В год своего 110-летия ОмГУПС уверенно смотрит в будущее, опираясь на свои исторические традиции, стремится наращивать свой вклад в дело подготовки высококвалифицированных кадров для железных дорог России.

Приглашаем ученых и специалистов всех видов транспорта принять участие в наших юбилейных мероприятиях. Мы готовы принять Ваши предложения по публикации материалов по проблемам и перспективам развития железнодорожного транспорта.



*С уважением, ректор ОмГУПСа А. Ю. Панычев*

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ  
ЖУРНАЛА**

- 1. Галиев Ильхам Исламович** – главный редактор, президент ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
- 2. Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, проректор по научной работе и инновациям ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
- 3. Володин Александр Иванович** – первый проректор ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ.
- 4. Бокарев Сергей Александрович** – проректор по научной работе СГУПСа, 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 ИрГУПСа, д.т.н., профессор (Иркутск).
- 7. Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
- 8. Косьых Анатолий Владимирович** – проректор по научной работе ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
- 9. Серенко Андрей Федорович** – проректор по научной работе ДВГУПСа, 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 НИЧ ОмГУПСа (Омск).
- Комякова Ольга Олеговна** – ответственный секретарь, к.т.н., доцент ОмГУПСа (Омск).

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Подвижной состав железных дорог**

Блинов П. Н., Блинов А. П. Модель процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей с учетом технологических характеристик ее деталей .....	2
Бородин А. В., Тарута Д. В., Вельгодская Т. В. Повышение несущей способности зубчатой передачи тягового редуктора тепловоза .....	7
Гришина Ю. Б., Михеев В. А., Анисимов А. С. Влияние характеристик топлива и топливных присадок на параметры дизеля .....	12
Климович А. В., Кообар А. А., Лендясов А. С. Методика определения сопротивления движению поезда по данным электронного регистратора параметров движения .....	16
Сидоров О. А., Маркелова К. С., Мусаткина Б. В. Исследование характеристик токоприемников монорельсового транспорта .....	24
Сквородников Е. И., Лифанов М. В., Анисимов А. С. Сравнительный анализ эффективности работы дизелей ПД1М и 1-ПД4Д в условиях эксплуатации .....	32

**Транспортная энергетика**

Ведрученко В. Р., Крайнов В. В., Кокшаров М. В. Теплотехнический контроль как важное направление в экономии топлива в котельных установках железнодорожного транспорта .....	44
Ерита А. М., Кандаев В. А., Авдеева К. В. Параметры изолированного цилиндрического проводника в однородной среде .....	50
Казачков В. С., Когут С. А. Учет энергоресурсов на предприятиях железнодорожного транспорта на основе АСКУЭ .....	59
Пашков Д. В., Пономарев А. В. Некоторые особенности моделирования электропотребления технологического процесса среднего ремонта электровозов .....	65
Ушаков С. Ю., Гутников В. И., Ларин А. Н. Проблема организации достоверного учета электрической энергии в «горячем» простое локомотивов при депо и ее распределения по причастным бизнес-единицам .....	70

**Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации**

Лунев С. А., Борисенко Д. В., Аюпов Р. Ш. Перспективные методы проектирования и управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте .....	76
Любченко А. А. Анализ структуры системы для определения местоположения подвижного состава на основе спутниковой навигации .....	83
Сидоренко А. С. Ограничения алгоритмов параллельных вычислений в цифровой обработке сигналов .....	89
Хряков А. А. Компенсация смещения нуля в счетчиках электрической энергии постоянного тока .....	94

**Организация производства на транспорте**

Сафонов Э. А., Сафонов К. Э., Семенова Е. С. Инновационный путь развития метрополитенов в современных условиях .....	103
Никифоров М. М. Целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электропотребления на нетяговые нужды .....	110

АННОТАЦИИ .....	117
-----------------	-----

# Подвижной состав железных дорог

УДК 629.424.3:621.436.03.001.42

П. Н. Блинов, А. П. Блинов

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРОЙ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЕ ДЕТАЛЕЙ

В статье рассматриваются параметры топливной аппаратуры дизелей, влияющие на неравномерность топливоподачи по цилиндрам. Предложена математическая модель процесса топливоподачи, которую необходимо применять при формировании комплектов перед их установкой на дизель и для расчета параметров деталей, используемых при обкатке топливных насосов высокого давления на стендах с целью приближения условий работы на стенде к реальным условиям работы на дизеле и правильного определения производительности насосов на стенде.

Одним из основных эксплуатационных критериев правильного функционирования дизеля является минимальный удельный расход топлива, обеспечиваемый при минимальной неравномерности цикловой подачи топлива по цилиндрам дизеля. На цикловую подачу топлива  $g_{\text{ц}}$  и ее неравномерность  $\Delta g_{\text{ц}}$  оказывают влияние различные технологические и конструкционные характеристики элементов топливной аппаратуры (ТА).

Топливные системы тепловозных дизелей комплектуются из топливных насосов высокого давления (ТНВД), нагнетательных трубопроводов (НТ) и закрытых форсунок. В общем виде величину подачи  $g_{\text{ц}}$  можно представить как функцию производительности  $Q_{\text{н}}$  топливного насоса высокого давления и расхода топлива через нагнетательный трубопровод  $Q_{\text{тр}}$  и форсунку  $Q_{\phi}$ :

$$\Delta g_{\text{ц}} = f(Q_{\text{н}}, Q_{\text{тр}}, Q_{\phi}). \quad (1)$$

Производительность ТНВД  $Q_{\text{н}}$  определяется выходом рейки  $x_p$ , плотностью плунжерной пары  $\rho_{\text{п}}$  и нагнетательного клапана  $\rho_{\text{н.к}}$ , давлением открытия нагнетательного клапана  $P_{\text{н.к}}$  и жесткостью его пружины  $C_{\text{н.к}}$  (рисунок 1):

$$Q_{\text{н}} = f(x_p, \rho_{\text{п}}, \rho_{\text{н.к}}, P_{\text{н.к}}, C_{\text{н.к}}). \quad (2)$$

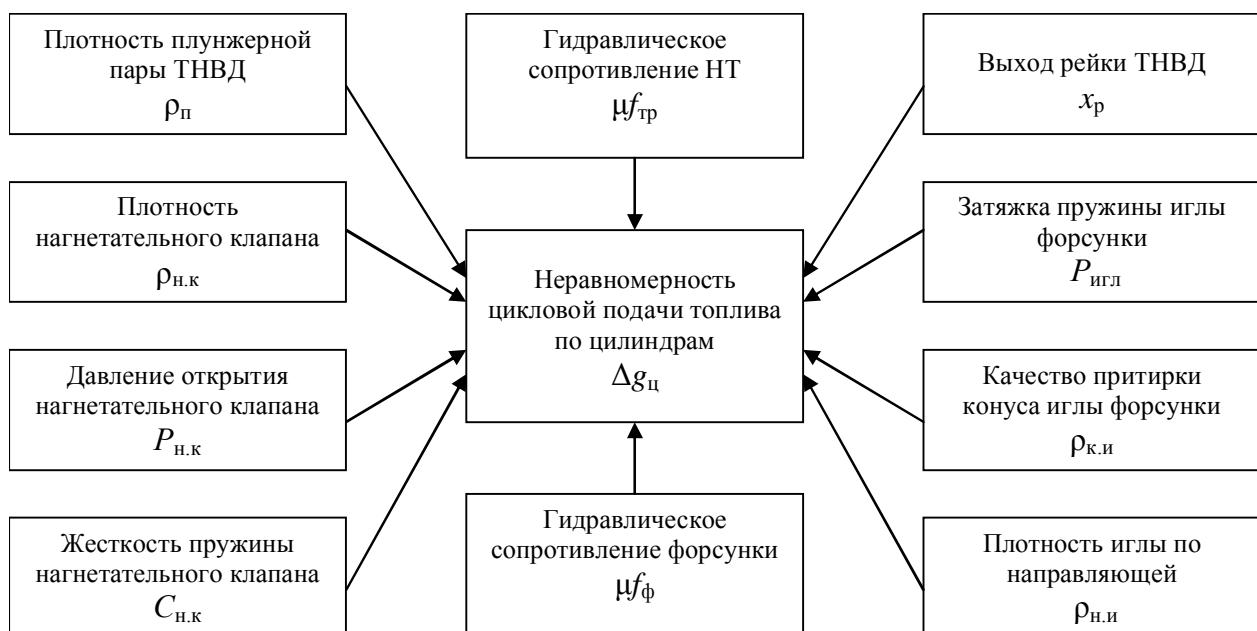


Рисунок 1 – Параметры ТА, влияющие на неравномерность топливоподачи в дизеле

# Подвижной состав железных дорог

Расход топлива через НТ  $Q_{\text{тр}}$  зависит от его гидравлического сопротивления (эффективного проходного сечения)  $\mu f_{\text{тр}}$ :

$$Q_{\text{тр}} = f(\mu f_{\text{тр}}). \quad (3)$$

Расход топлива через форсунку  $Q_{\phi}$  есть функция гидравлического сопротивления (эффективного проходного сечения) форсунки  $\mu f_{\phi}$ , затяжки пружины иглы  $P_{\text{игл}}$ , качества притирки конуса иглы  $\rho_{\text{к.и}}$ , плотности иглы по направляющей  $\rho_{\text{н.и}}$ :

$$Q_{\phi} = f(\mu f_{\phi}, P_{\text{игл}}, \rho_{\text{к.и}}, \rho_{\text{н.и}}). \quad (4)$$

Величины  $\rho_{\text{п}}, \rho_{\text{н.к}}, P_{\text{н.к}}, C_{\text{н.к}}$  определяют группу ТНВД по минимальной производительности, которая учитывается существующей технологией при установке ТНВД на дизель. Величина  $x_p$  устанавливается при регулировке ТНВД на стендах по их обкатке и контролируется после их установки на дизель [1 – 4].

Величина  $P_{\text{игл}}, \rho_{\text{к.и}}, \rho_{\text{н.и}}$  регулируется и проверяется на стенах по настройке форсунок перед их установкой на дизель [5, 6].

Технологией технического обслуживания и ремонта тепловозных дизелей предусматривается проверка гидравлического сопротивления сопловых наконечников форсунок [1 – 4]. Гидравлические характеристики форсунок в сборе не контролируются. Гидравлические характеристики НТ контролируются только для дизелей, имеющих трубопроводы большой длины (11Д45, 5Д49, 14Д40 и др.). Однако существующие средства контроля гидравлических характеристик элементов ТА не обеспечивают заданной точности, в результате на дизель устанавливаются трубопроводы и форсунки, имеющие большие разбросы по гидравлическим характеристикам, что приводит к значительной неравномерности подачи топлива по цилиндрам дизеля [7].

Обоснование допустимых диапазонов разброса гидравлических характеристик элементов ТА и их учета при формировании комплектов по результатам испытаний на стенах возможны с помощью моделирования процесса топливоподачи с последующей проверкой результатов на практике.

В топливной системе давление под конусом иглы, а следовательно, и определяемая этим давлением скорость впрыска топлива резко изменяются, причем в первой половине процесса впрыска они возрастают до максимального значения, в конце впрыска скорость уменьшается до нуля, а давление – до значения давления в цилиндре.

Особенности протекания процесса подачи топлива позволяют считать его кратковременным единичным импульсом давления топлива (ИДТ), который возникает во входном сечении НТ вследствие выталкивания топлива плунжером насоса из объема полости нагнетания. Поскольку топливо – сжимаемая жидкость, то во входном сечении НТ возникает неустановившееся давление сжимаемой жидкости, при котором от ТНВД к форсунке идет волна давления со скоростью звука.

Основным фактором, формирующим характер изменения и величину ИДТ, является скорость движения плунжера ТНВД, определяемая профилем топливного кулачка и скоростным режимом двигателя. Однако некоторые факторы существенно искажают ИДТ. К ним следует отнести наличие объема в полости нагнетания (надплунжерное пространство) и в штуцере насоса; движение нагнетательного клапана; перетекание топлива через всасывающие окна до их перекрытия плунжером; утечки топлива через зазоры между плунжером и втулкой при их значительном износе; шероховатость и упругость стенок НТ; наличие запорного органа форсунки – иглы, обеспечивающей при своем открытии резкий переход от проходного сечения НТ к проходным сечениям распыливающих отверстий форсунки; гидравлическое сопротивление каналов элементов ТА.

Последовательность движения ИДТ по тракту высокого давления топливной системы можно проследить по функциональной схеме топливоподачи, представленной на рисунке 2.

# Подвижной состав железных дорог

Элементы комплекта ТА высокого давления характеризуются множеством размеров и параметров, имеющих определенные допуски на изготовление. Формирование комплектов с произвольным сочетанием исходных параметров определяет некоторый диапазон разброса выходных показателей комплекта ТА, который регламентируется заводами-изготовителями. Этот диапазон может быть сужен путем применения высокоточного обрабатывающего и измерительного оборудования в заводских условиях.

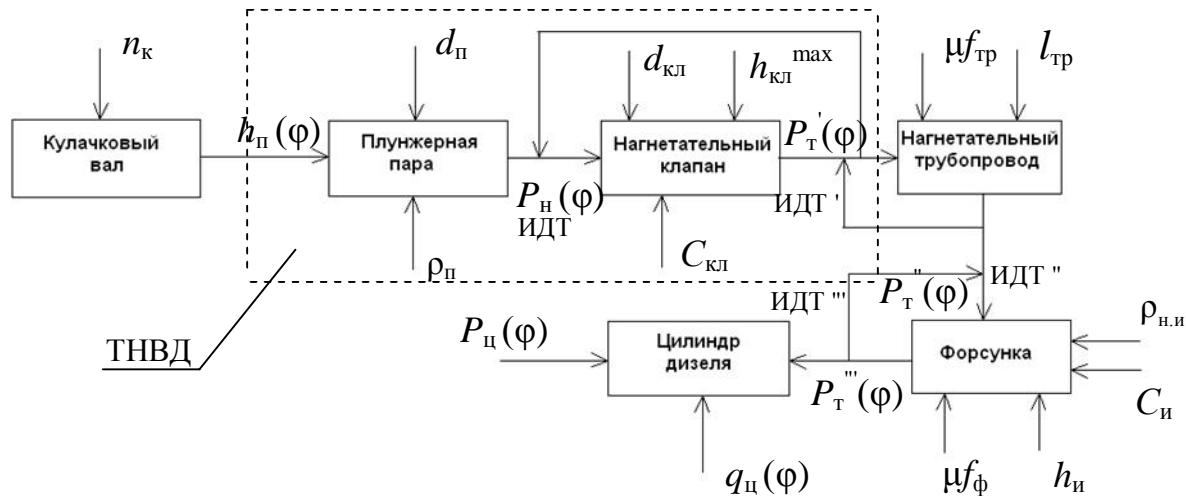


Рисунок 2 – Функциональная схема топливоподачи

В процессе эксплуатации происходят следующие виды износа: абразивный износ прецизионных пар; нарушение герметичности посадочных мест нагнетательных клапанов и распылителей; эрозионный, кавитационный и гидравлический износ переходных поверхностей и острых кромок.

Кроме этого в процессе ремонта, монтажа и демонтажа имеют место следующие нарушения: смятие сопрягающих поверхностей штуцера ТНВД, НТ и форсунки; обезличивание деталей; восстановление изношенных сопрягающих поверхностей по технологии, отличной от заводской. Указанные виды износа и нарушений требуют применения соответствующего измерительного оборудования для контроля исходных размеров и более совершенной методики формирования комплектов ТА, учитывающей эти размеры.

Из функциональной схемы топливоподачи (см. рисунок 2) следует, что импульс давления топлива, формируемый в полости нагнетания ТНВД зависит от ряда конструктивных факторов: частоты вращения кулачкового вала  $n_k$ ; хода плунжера  $h_{\Pi}(\varphi)$  (профиля кулачка); диаметра плунжера  $d_{\Pi}$ ; плотности плунжерной пары  $\rho_{\Pi}$ ; диаметра нагнетательного клапана  $d_{кл}$ , его максимального хода  $h_{кл}^{max}$  и жесткости его пружины  $C_{кл}$ ; эффективного проходного сечения НТ  $\mu f_{тр}$  и его длины  $l_{тр}$ ; плотности распылителя  $\rho_{н.и}$ , хода иглы форсунки  $h_i$ , жесткости ее пружины  $C_i$  и эффективного проходного сечения форсунки  $\mu f_{\Phi}$ , а также от давления в выходных сечениях составляющих элементов ( $P_t$ ,  $P_t''$ ,  $P_t'''$ ,  $P_{\Pi}$ ).

Естественно, что путь стопроцентного контроля всех перечисленных параметров элементов ТА следует признать нецелесообразным, так как это потребует применения дорогостоящего высокоточного оборудования, привлечения дополнительного обслуживающего персонала и наличия необходимого запаса деталей. Поэтому с целью улучшения работы дизелей за счет сокращения неравномерности топливоподачи по цилиндрам необходимо применение на ремонтных предприятиях измерительного оборудования, позволяющего контролировать обобщенные характеристики элементов, с учетом которых можно было бы формировать комплекты ТА.

# Подвижной состав железных дорог

Методика формирования комплектов с учетом гидравлических характеристик элементов ТА может быть разработана с помощью теоретических исследований влияния этих характеристик на выходные показатели комплекта. Однако сложность существующих методов расчета, связанных с решением системы гиперболических уравнений, требует разработки укрупненных методов расчета, позволяющих учесть обобщенные гидравлические характеристики (ОГХ) составляющих элементов комплекта ТА. Тогда топливную систему высокого давления следует рассматривать как состоящую из трех узловых объектов: ТНВД, НТ и форсунки (рисунок 3). В этом случае давление топлива в надплунжерной полости ТНВД ( $P_h$ ) является функцией хода плунжера  $h_n(\phi)$ ; давление в штуцере ТНВД (перед нагнетательным трубопроводом) ( $P_{шт}$ ) – функцией эффективного проходного сечения нагнетательного клапана ТНВД  $\mu f_{кл}$  и давления  $P_h$ ; давление на входе форсунки ( $P_\phi$ ) – функцией эффективного проходного сечения НТ  $\mu f_{тр}$  и давления  $P_{шт}$ ; величина подачи топлива в цилиндр ( $q_n$ ) – функцией эффективного проходного сечения форсунки  $\mu f_\phi$ , давления газов в цилиндре  $P_\pi$  и давления  $P_\phi$ , т. е.

$$P_h(\phi) = F_1[h_n(\phi)]; \quad (5)$$

$$P_{шт}(\phi) = F_2[P_h(\phi), \mu f_{кл}]; \quad (6)$$

$$P_\phi(\phi) = F_3[P_{шт}(\phi), \mu f_{тр}]; \quad (7)$$

$$q_n(\phi) = F_4[P_\phi(\phi), \mu f_\phi, P_\pi]. \quad (8)$$

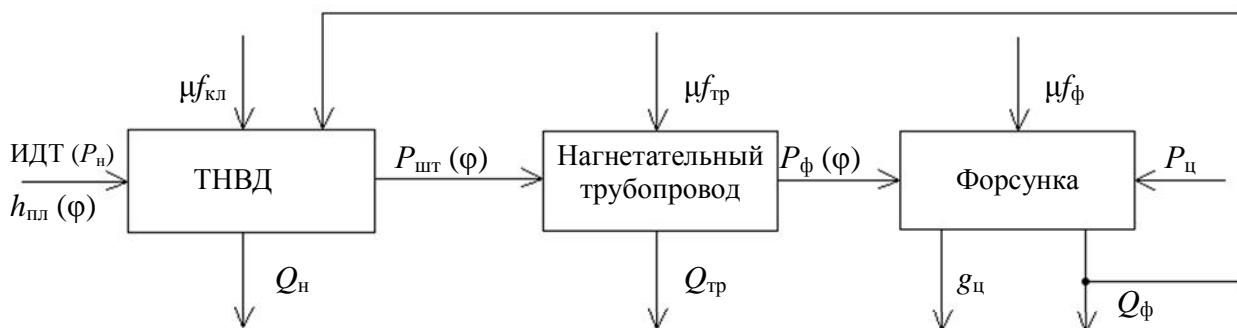


Рисунок 3 – Схема тракта высокого давления ТА дизеля

Для фиксированного частотного режима из условия неразрывности потока жидкости (топлива), определяющего баланс расходов по тракту высокого давления, следует:

$$Q_h = Q_{тр} = Q_\phi = Q, \quad (9)$$

где  $Q_h$ ,  $Q_{тр}$ ,  $Q_\phi$  – расход топлива через ТНВД, НТ и форсунку соответственно,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Расход топлива через указанные элементы может быть определен по выражению [8]:

$$Q = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_1 - P_2}, \quad (10)$$

где  $\mu f$  – эффективное проходное сечение элемента,  $\text{м}^2$ ;

$\rho$  – плотность топлива,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$P_1$ ,  $P_2$  – давление топлива на входе и выходе элемента, Па.

Тогда, в соответствии с рисунком 3, будем иметь:

$$Q_h = \mu f_{кл} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_h - P_{шт}} ; \quad (11)$$

$$Q_{тр} = \mu f_{тр} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{шт} - P_\phi} ; \quad (12)$$

# Подвижной состав железных дорог

$$Q_{\phi} = \mu f_{\phi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_h - P_u} \quad (13)$$

или с учетом (9):

$$P_h - P_{\text{шт}} = \frac{Q^2 \rho}{2(\mu f_{\text{кл}})^2}; \quad (14)$$

$$P_{\text{шт}} - P_{\phi} = \frac{Q^2 \rho}{2(\mu f_{\text{тр}})^2}; \quad (15)$$

$$P_{\phi} - P_u = \frac{Q^2 \rho}{2(\mu f_{\phi})^2}. \quad (16)$$

После сложения уравнений (14) – (16) получается:

$$P_h - P_u = \frac{Q^2 \rho}{2} \left( \frac{1}{(\mu f_{\text{кл}})^2} + \frac{1}{(\mu f_{\text{тр}})^2} + \frac{1}{(\mu f_{\phi})^2} \right), \quad (17)$$

откуда

$$Q = \sqrt{\frac{2(P_h - P_u)}{\rho \left[ \frac{1}{(\mu f_{\text{кл}})^2} + \frac{1}{(\mu f_{\text{тр}})^2} + \frac{1}{(\mu f_{\phi})^2} \right]}}. \quad (18)$$

Таким образом, для фиксированных значений  $P_u$  и  $\rho$  при неизменном профиле кулачка, формирующем величину  $P_h$ , расход топлива по тракту высокого давления и, следовательно, величина подачи топлива в цилиндры определяются эффективным проходным сечением нагнетательного клапана ТНВД  $\mu f_{\text{кл}}$ , нагнетательного трубопровода  $\mu f_{\text{тр}}$  и форсунки  $\mu f_{\phi}$ . Поэтому обобщенной гидравлической характеристикой НТ является его эффективное проходное сечение  $\mu f_{\text{тр}}$ , а форсунки – эффективное проходное сечение  $\mu f_{\phi}$  (см. рисунок 3). Значения этих характеристик могут быть получены по параметрам распределений производительности трубопровода  $Q_{\text{тр}}$  и форсунки  $Q_{\phi}$ , полученным с помощью специализированных стендов, работа которых основана на проливке элементов топливом при заданном постоянном давлении [7]. Основными факторами, определяющими  $Q_{\text{тр}}$  и  $Q_{\phi}$ , и являются  $\mu f_{\text{тр}}$  и  $\mu f_{\phi}$  соответственно, поэтому они и могут быть приняты за базовые обобщенные гидравлические характеристики нагнетательных трубопроводов и форсунок.

При существующей технологии контроля и регулировки ТНВД на стенде замеряется производительность ТНВД:

$$Q_h = f(\mu f_{\text{кл}}) = f(Y_{\text{кл}}, f_{\text{кл}}, Q_{y_h}), \quad (19)$$

где  $Y_{\text{кл}}$  – ход нагнетательного клапана ТНВД, м;

$f_{\text{кл}}$  – площадь поперечного сечения клапана,  $\text{m}^2$ ;

$Q_{y_h}$  – утечки топлива через зазоры в плунжерной паре, определяемые плотностью плунжерной пары,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Следовательно, для фиксированных значений  $Q_h$  можно найти соответствующие значения  $Y_{\text{кл}}, f_{\text{кл}}, Q_{y_h}$ , которые будут являться эквивалентом базовых обобщенных гидравлических характеристик ТНВД. Значения  $Y_{\text{кл}}, f_{\text{кл}}, Q_{y_h}$  могут быть установлены статистически как начальные моменты их распределений.

Поскольку из выражения (18) следует, что производительность комплекта ТА зависит от обобщенных гидравлических характеристик нагнетательного трубопровода  $\mu f_{\text{тр}}$  и форсунки  $\mu f_{\phi}$ , то очевидна необходимость их учета при формировании комплектов ТА. Кроме этого при обкатке и настройке ТНВД на специализированных стендах требуется обеспечить необ-

# Подвижной состав железных дорог

ходимый уровень противодавления, соответствующий давлению газов в цилиндре дизеля  $P_{ц}$ , так как согласно выражению (18) производительность ТНВД зависит от противодавления  $P_{ц}$ . Это требование может быть реализовано на автоматизированном стенде, содержащем мерные гидроцилиндры и электроуправляемые гидропереключатели [7].

Разработанная модель процесса топливоподачи может быть применена при формировании комплектов ТА перед их установкой на дизель и для расчета параметров деталей ТА, используемых при обкатке ТНВД на стендах, применяемых в настоящее время в локомотивных депо. Это стены конструкции проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства – филиала открытого акционерного общества «Российские железные дороги» – для регулирования топливных насосов дизелей Д49 типа А2275, дизелей ПД1М и К6S310DR типа А2591, А2330 и А2652, дизеля 14Д40 типа А2353, дизелей Д100 типа А2592 и А2651.

Использование предложенной модели для модернизации указанных стендов позволит создать условия работы ТНВД на стендах, адекватные условиям работы на дизеле, и правильно определять производительность ТНВД на стендах.

## Список литературы

1. Правила технического обслуживания и текущего ремонта тепловозов типа ТЭ3 и ТЭ10 [Текст]. – М.: Транспорт, 1988. – 256 с.
2. Правила технического обслуживания и текущего ремонта тепловозов ТЭМ2, ТЭМ2А, ТЭМ2У и ТЭМ2УМ [Текст]. – М.: Техинформ, 1998. – 178 с.
3. Правила заводского ремонта тепловозов типа ТЭ3 и ТЭ10 [Текст]. – М.: Транспорт, 1972. – 285 с.
4. Правила технического обслуживания и текущего ремонта тепловозов 2ТЭ116 [Текст]. – М.: Транспорт, 1997. – 310 с.
5. Рахматуллин, М. Д. Технология ремонта тепловозов [Текст] / М. Д. Рахматуллин. – М.: Транспорт, 1983. – 319 с.
6. Федотов, Г. Б. Топливные системы тепловозных дизелей. Ремонт, испытания, совершенствование [Текст] / Г. Б. Федотов, Г. И. Левин. – М.: Транспорт, 1983. – 192 с.
7. Блинов, П. Н. Автоматизация стендовых испытаний топливной и регулирующей аппаратуры тепловозных дизелей [Текст] / П. Н. Блинов, А. П. Блинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2010. – № 1. – С. 8 – 15.
8. Испытание двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Б. С. Стефановский, Ю. М. Доколин и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 359 с.

---

УДК 621.833.1

А. В. Бородин, Д. В. Тарута, Т. В. Вельгодская

## ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ТАГОВОГО РЕДУКТОРА ТЕПЛОВОЗА

*Приводятся результаты исследования влияния кольцевых прорезей на несущую способность зубчатой передачи тягового редуктора локомотива.*

Результаты анализа статистических данных по выходу из строя тяговых редукторов локомотивов на железных дорогах Урала, Западной и Восточной Сибири позволяют утверждать, что тяговый редуктор является «узким» местом в конструкции экипажной части локомотива, неисправности которого занимают одно из первых мест в списке причин непланового ремонта тепловозов, уступая лишь износу гребней колесных пар.

# Подвижной состав железных дорог

Обзор научно-исследовательских работ и анализ условий эксплуатации позволяют выявить основные причины выхода из строя тяговых редукторов тепловозов, связанные с изменением угла перекоса зубьев зубчатых колес от внешнего момента, что приводит к неравномерному распределению нагрузки по длине зуба и нештатной работе зубчатой передачи.

Особенности нагрузок, действующих на тяговый редуктор тепловозов с односторонней цилиндрической прямозубой тяговой зубчатой передачей, а именно снижение работоспособности из-за неравномерности распределения нагрузки по длине зубьев в односторонней прямозубой передаче и обусловленное этим повышение кромочного контактного давления при перекосе зубьев послужили причиной выбора объекта исследования – тягового редуктора тепловоза.

В работе [1] представлены результаты теоретических исследований влияния кольцевых прорезей зубьев на податливость венцов зубчатых колес. Полученные результаты свидетельствуют о том, что кольцевые прорези несколько уменьшают среднюю жесткость зуба и делают зуб более податливым в осевом направлении.

Однако аналитические методы не позволяют получить реальную картину адаптации зуба к меняющейся нагрузке и перекосам осей зубчатых колес. Выполненные теоретические исследования не учитывали ряд факторов, влияющих на процессы, протекающие в зоне кромочного контакта. Следовательно, проблема кромочного контакта зубьев не имеет точного аналитического решения [2] и необходимо проведение стендовых испытаний для оценки меры влияния геометрии зуба на его жесткость и прочность.

Авторами разработана конструкция стенда (рисунок 1), включающая в себя основание 1 с четырьмя установленными на нем стойками 2. В стойках содержатся втулки 3, в которых расточены отверстия под подшипники качения 4 и скольжения 5. Подшипники поддерживают подвижный 6 и неподвижный 7 валы. На подвижный вал посажено зубчатое колесо 8, имеющее кольцевые прорези, и диск 9 для нагружения вала вращающим моментом. Колесо и диск разделены втулкой 10. На неподвижный вал 7 установлено зубчатое колесо 11, не имеющее кольцевых прорезей. Колеса и диск жестко связаны с валами шпонками 12. Фиксирование вала 7 в требуемом положении осуществляется призматическими шпонками 13, вставляемыми в пазы 14. Нагружение зубьев осуществлялось мерными грузами, прикладываемыми к рычагу 15, соединенному с диском 9. Поверхность основания 1 и опорные поверхности стоек 2 проверены на неплоскостность. При сборке стендка контролировалось расстояние К для всех стоек. Перпендикулярность стоек относительно основания и па-

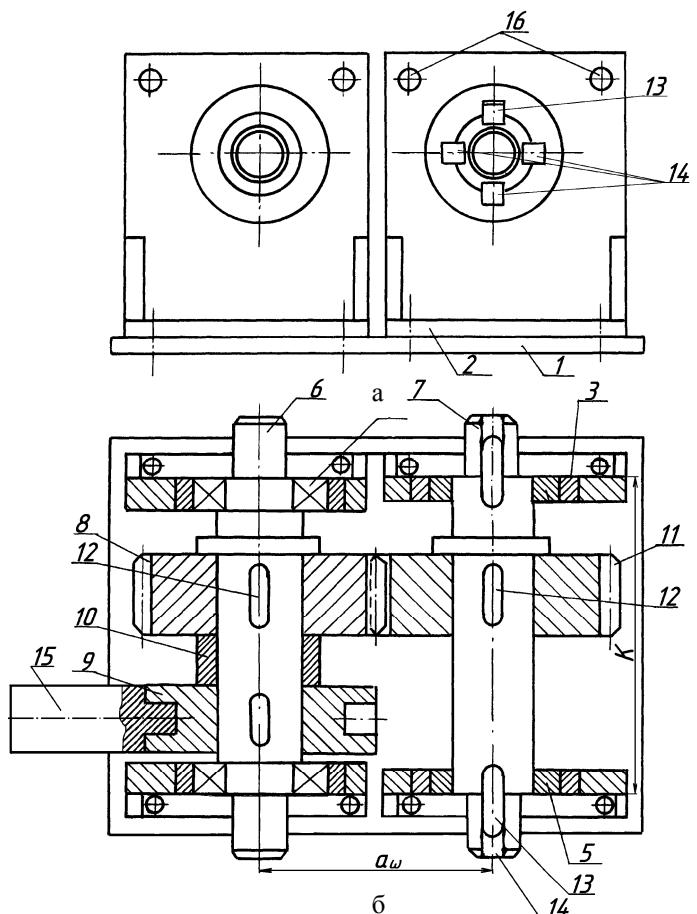


Рисунок 1 – Стенд для исследования пятна контакта при перекосах осей колес

# Подвижной состав железных дорог

параллельность их между собой обеспечивались с помощью стержней, вставляемых в отверстия 16 стоек 2. Стержни позволяли обеспечивать параллельность стоек в процессе нагружения зубчатых колес.

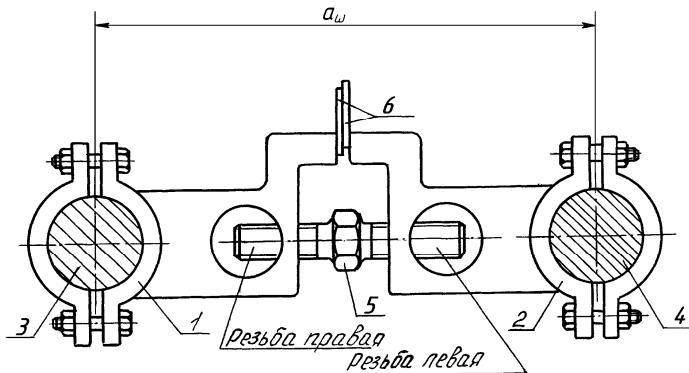


Рисунок 2 – Устройство для регулирования межосевого расстояния и угла перекоса осей валов

податливость зуба в тяговом редукторе тепловоза и установление зависимости податливости зуба от этих параметров проводилось с использованием метода планирования эксперимента, учитывавшего два основных фактора: угол перекоса осей валов колес и нагрузку, действующую на зубья во время работы передачи.

Эксперимент проводился с зубчатой передачей, имеющей следующие параметры: модуль  $m = 5$  мм, передаточное число  $i = 1$ , числа зубьев шестерни и колеса  $z_1 = z_2 = 38$ , ширина венца  $b = 80$  мм, межосевое расстояние  $a_w = 190$  мм. Нагружение осуществлялось грузами на плече 0,9 м с вращающими моментами 270, 540 и 810 Н·м.

При проведении экспериментов исследуемые колеса имели различные сочетания прорезей по направлению, глубине и их количеству (рисунок 3).

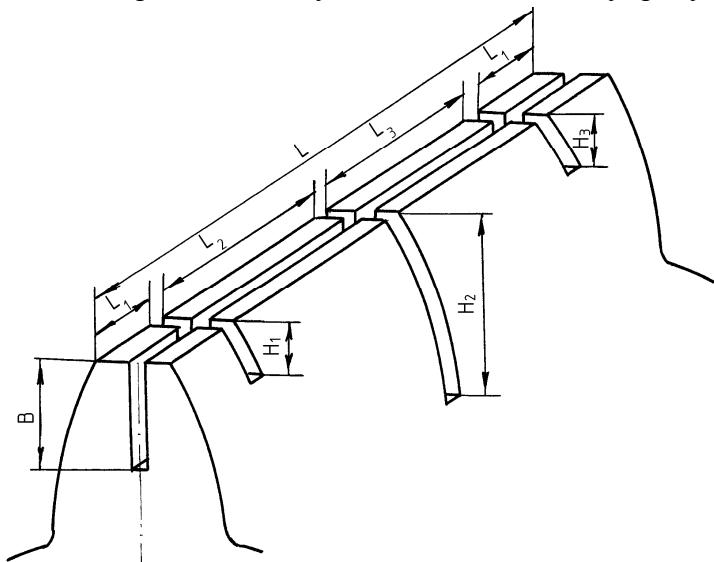


Рисунок 3 – Размерные параметры зуба цилиндрического колеса с тремя кольцевыми прорезями

Межосевое расстояние  $a_w$  выставлялось с помощью специального устройства (рисунок 2). Скобы 1 и 2 устанавливались на концевые участки валов 3 и 4 с обеих сторон с помощью клеммовых зажимов. Точное регулирование величины  $a_w$  осуществлялось винтовой стяжкой 17, имеющей левую и правую резьбу. Винтовая стяжка позволяла установить требуемый угол перекоса валов, а следовательно, и зубьев колес с помощью плиток 6, вставляемых между контактирующими поверхностями скоб 1 и 2.

Экспериментальное исследование влияния основных параметров на податливость зуба в тяговом редукторе тепловоза и установление зависимости податливости зуба от этих параметров проводилось с использованием метода планирования эксперимента, учитывавшего два основных фактора: угол перекоса осей валов колес и нагрузку, действующую на зубья во время работы передачи.

Статическим испытаниям подвергались зубчатые колеса с целым зубом и имеющим три и семь кольцевых прорезей и продольная прорезь. При этом варьировались величины нагрузок и углы перекоса осей колес.

Податливость зубьев колеса оценивалась площадью пятна контакта. Рабочая поверхность разрезанного зуба покрывалась тонким слоем краски. После взаимодействия на зубе неподвижного колеса отображалось пятно контакта (рисунок 4), площадь которого определялась планиметром с точностью 1–2  $\text{мм}^2$ .

# Подвижной состав железных дорог

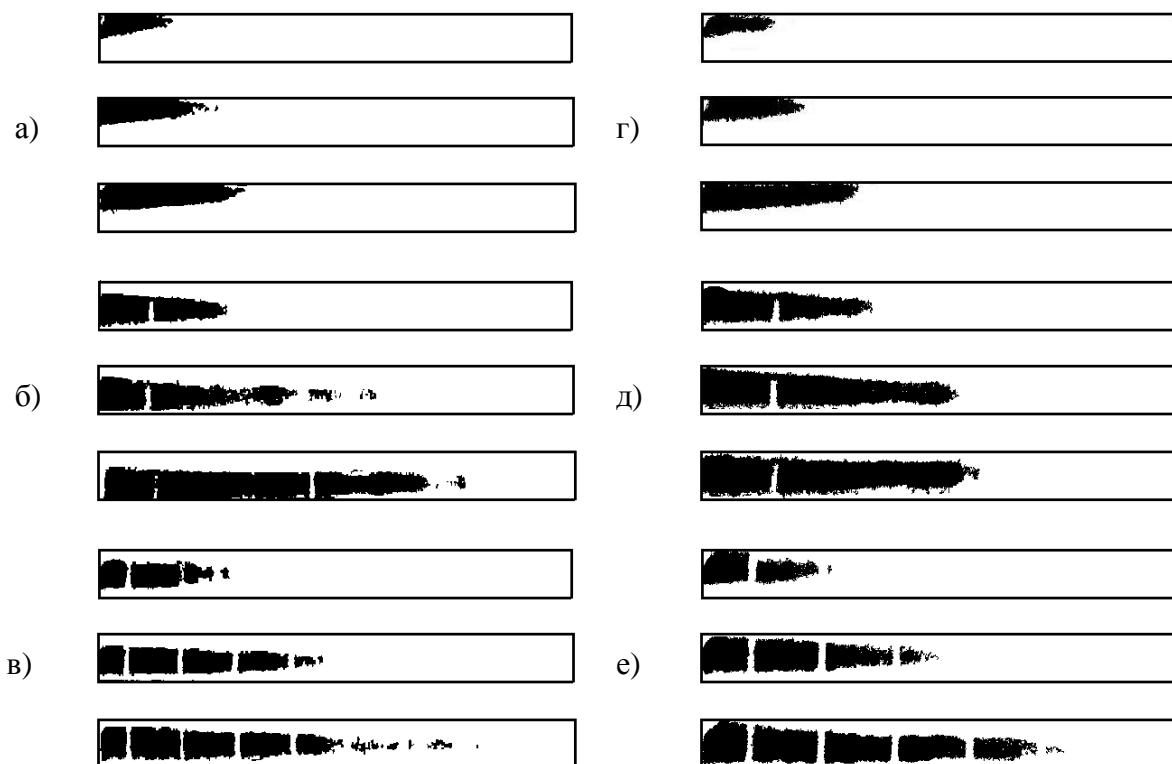


Рисунок 4 – Пятна контакта на зубьях колеса при нагрузках 270, 540 и 810 Н·м: а, б, в – угол перекоса осей колес 3,89'; г, д, е – угол перекоса осей колес 9'; а, г – целый зуб; б, д – зуб с тремя кольцевыми прорезями; в, е – зуб с семью кольцевыми прорезями

Результаты испытаний приведены в таблице и представлены графиками на рисунке 5.

Результаты испытаний зубчатой передачи

Угол перекоса осей колес	Нагрузка Т, Н·м	Площадь пятна контакта А, мм <sup>2</sup>		
		целый зуб	зуб с тремя кольцевыми прорезями	зуб с семью кольцевыми прорезями
3,89'	270	30,0	75,0	67,5
	540	40,0	150,0	162,5
	810	60,0	231,0	237,0
9'	270	24,0	62,0	62,5
	540	36,0	137,5	150,0
	810	52,0	225,0	230,0
13'	270	21,0	44,0	57,5
	540	30,0	102,5	135,0
	810	37,5	210,0	219,0

На рисунке 5 показаны зависимости площади пятна контакта целого зуба (кривые 1, 2, 3) при углах перекоса осей колес 3,89', 9', 13' и имеющего три кольцевые прорези (кривые 4, 5, 6) при тех же углах перекоса осей.

Анализ данных эксперимента показывает, что с увеличением нагрузки площадь пятна контакта заметно растет (см. рисунок 5, кривые 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6), а увеличение угла перекоса осей колес приводит к уменьшению пятна контакта (см. рисунок 5, кривые 1, 2, 3 и 4, 5, 6).

С целью выявления зависимости податливости зуба от количества кольцевых прорезей проведен эксперимент с зубом, имеющим семь кольцевых прорезей. В этом случае наблюдается рост площади пятна контакта, однако ее увеличение является незначительным по сравнению с результатами испытания зуба, имеющего три кольцевые прорези (см. таблицу).

# Подвижной состав железных дорог

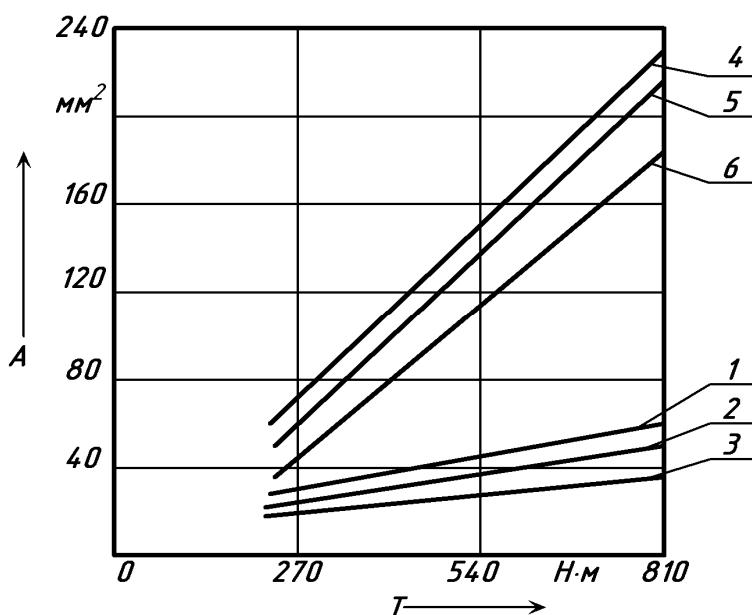


Рисунок 5 – Зависимость площади пятна контакта от нагрузки и перекоса осей колес

Это объясняется тем, что при увеличении количества прорезей уменьшается жесткость головки зуба, что не вовлекает в работу неразрезанную ножку зуба, имеющую более высокую жесткость. Это подтверждают результаты теоретических исследований [1].

Приведенный анализ экспериментальных данных наглядно иллюстрируется пятнами контакта (см. рисунок 4), полученными в экспериментах с разрезанным и целым зубьями при перекосах осей колес 3,89' и 9'.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Прорези увеличивают суммарную площадь пятен контакта на профилях зубьев. Каждая последующая часть зуба нагружается плавно, постепенно, создаются благоприятные условия для равномерного распределения напряжений по длине контактных линий зуба.

Сравнение площадей пятен контакта неразрезанного и разрезанного на части зуба показывает, что у последнего она увеличивается в 2,5 – 3,85 раза. Особенно ярко это проявляется при перекосах валов 9' и 13', где увеличение площади пятна контакта достигает 5,6 раза.

2. Прорези делают зуб более податливым в осевом направлении, что способствует равномерному распределению усилий по длине зуба, а в целом – повышению несущей способности тягового редуктора локомотива.

3. Количество кольцевых прорезей более трех не приводит к существенному повышению пятна контакта и может снизить прочность зуба до опасных напряжений изгиба.

Таким образом, в зубчатой передаче с кольцевыми канавками малой ширины повышается несущая способность из-за более равномерного распределения нагрузки по длине контактных линий зацепления и увеличивается срок ее службы, что позволяет повысить безотказность тягового редуктора тепловоза в целом.

## Список литературы

1. Бородин, А. В. Влияние кольцевых прорезей на податливость зубчатых колес [Текст]/ А. В. Бородин, Т. В. Вельгодская, И. Л. Рязанцева // Техника машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 78 – 82.
2. Айрапетов, Э. Л. Совершенствование методов расчета нагруженности и прочности передач зацеплением [Текст] / Э. Л. Айрапетов // Техника машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 8 – 34.

# Подвижной состав железных дорог

УДК 629.424.1:502.1

Ю. Б. Гришина, В. А. Михеев, А. С. Анисимов

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВА И ТОПЛИВНЫХ ПРИСАДОК НА ПАРАМЕТРЫ ДИЗЕЛЯ

*Задача снижения выбросов вредных веществ тепловозными дизелями может быть решена только комплексом мероприятий, направленных на совершенствование конструкции дизеля, системы технического обслуживания и ремонта дизелей, учет условий эксплуатации, повышение качества дизельного топлива и масла, создание многофункциональных присадок к дизельному топливу, применение альтернативных видов топлива.*

Отработавшие газы (ОГ) тепловозных дизелей представляют собой сложную многокомпонентную смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных твердых частиц. Всего ОГ двигателей внутреннего сгорания содержат около 280 компонентов, среди которых можно выделить содержащиеся в воздушном заряде цилиндра азот  $N_2$  и кислород  $O_2$ , продукты полного сгорания топлива (диоксид углерода  $CO_2$  и водяной пар  $H_2O$ ), вещества, образующиеся в результате термического синтеза из воздуха при высокой температуре (оксиды азота  $NO_x$ ), продукты неполного сгорания топлива (монооксид углерода  $CO$ , углеводороды  $CH_x$ , дисперсные твердые частицы, основным компонентом которых является сажа), а также оксиды серы, альдегиды, продукты конденсации и полимеризации. Кроме продуктов сгорания топлива в ОГ дизелей присутствуют продукты сгорания смазочного масла и вещества, образующиеся из присадок к топливу и маслу. В незначительных количествах, около 2 %, ОГ содержат водород  $H_2$  и инертные газы.

Наиболее массовыми компонентами продуктов сгорания являются атмосферный азот, диоксид углерода, пары воды и избыточный кислород [1]. На большинстве эксплуатационных режимов их суммарный объем в ОГ составляет 90 – 95 %. Из этих основных компонентов лишь углекислый газ относится к слаботочным веществам. Объемная концентрация токсичных веществ в ОГ сравнительно невелика и составляет 0,2 – 2 %. При этом около 80 – 95 % от общей массы токсичных компонентов ОГ приходится на долю пяти основных элементов:  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH_x$ , альдегидов  $RCHO$ , диоксида серы  $SO_2$ . Наибольшее содержание альдегидов в ОГ отмечается при работе непрогретого двигателя на режимах пуска и холостого хода, имеющих иногда сравнительно большую долю в общем распределении режимов работы.

Наиболее значимые газообразные токсичные компоненты ОГ – оксиды азота  $NO_x$ . Это газы, образующиеся в камере сгорания дизелей при температуре выше 2800 К и давлении около 1,02 МПа. Из оксидов азота  $NO_x$ , содержащихся в ОГ дизелей, 80 – 90 % объема приходится на монооксид  $NO$  и 10 – 20 % – на диоксид  $NO_2$ . Монооксид азота является нестабильным компонентом. В атмосфере при нормальных условиях  $NO$  окисляется до  $NO_2$  примерно за 100 часов.

Монооксид углерода (угарный газ)  $CO$  присутствует в атмосфере в очень малых количествах, а в ОГ двигателей внутреннего сгорания его содержание может достигать высоких удельных значений. Время его существования в атмосфере достигает 42 месяцев, за этот срок он окисляется до углекислого газа.

Отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания содержат до 200 различных углеводородов, представляющих следующие гомологические ряды: алканы или парафины, алкены или олефины, цикланы или нафтены, ароматические углеводороды, в том числе полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Наиболее значимыми из них являются легкие газообразные углеводороды, ароматические углеводороды и ПАУ. К группе легких газообразных углеводородов  $CH_x$ , образующихся при сгорании топлива, относятся метан, пропан, этилен, ацетилен и ряд других. Из более тяжелых углеводородов следует отметить ароматические углеводороды – бензол, толуол, ксиол, этилбензол и триметилбензол.

# Подвижной состав железных дорог

В выхлопных газах дизелей обнаружено более 20 ПАУ. Наиболее токсичным веществом из ПАУ является бензапирен, доля которого в суммарном выбросе ПАУ достигает до 3,7 %.

Сажа состоит в основном из углерода С (до 95 – 98 %) и химически связанного водорода Н (1 – 3 %). Наличие сажи в ОГ двигателей внутреннего сгорания приводит к потере их прозрачности (увеличению оптической плотности) и появлению облака дыма черного цвета. Оптическая плотность ОГ зависит в первую очередь от количества и размеров сажистых частиц, а также от содержания в выхлопе паров воды, несгоревших частиц масла и топлива. Дымление обычно характерно для дизельных двигателей, работающих на режимах с низким коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha < 1,2$ ). Видимое дымление дизелей соответствует содержанию сажи в ОГ в количестве, превышающем 0,1 г/м<sup>3</sup>.

Сажа – не единственное твердое вещество, содержащееся в ОГ. Другие твердые вещества – сульфаты (соли оксидов серы) – образуются при сгорании серы и ее соединений, содержащихся в топливе и масле. Кроме того, в выхлопных газах присутствуют твердые вещества, образующиеся в результате сгорания моторного масла, попадающего в камеру сгорания, а также металлы (сталь, никель, медь, цинк и др.) и их оксиды, являющиеся продуктами износа деталей двигателя и компонентами присадок к топливу и моторному маслу.

Все твердые частицы состоят из растворимых и нерастворимых в органических растворителях фракций. В быстроходных дизелях соотношение между содержанием в ОГ растворимых и нерастворимых фракций составляет 1:9. Первые представляют собой в основном несгоревшие фракции топлива и моторного масла, а последние – сажу. Причем на большинстве эксплуатационных режимов работы дизеля нерастворимые твердые частицы на 20 – 30 % состоят из сажи, а остальные компоненты – это в основном оксиды металлов и сульфаты. На режимах работы дизеля с низкими коэффициентами избытка воздуха ( $\alpha < 1,2$ ) сажа составляет большую часть массы твердых частиц (до 95 – 98 %).

При сгорании серы и ее соединений, содержащихся в топливе и масле, кроме твердых частиц образуются неорганические газы – диоксид серы SO<sub>2</sub> и триоксид серы SO<sub>3</sub>, а также сероводород H<sub>2</sub>S. В ОГ дизелей на долю диоксида серы приходится 97 – 98 % от общего содержания оксидов серы, а на долю триоксида – 2 – 3 %. Диоксид серы SO<sub>2</sub> сохраняется в атмосфере от нескольких часов до нескольких дней, а затем окисляется до высшего оксида SO<sub>3</sub>.

Кислородосодержащие углеводороды – альдегиды RCHO – являются продуктами неполного сгорания и образуются на ранних стадиях окисления углеводородов топлива. Для них характерно наличие в молекуле углеводородного радикала R и карбонильной группы CHO. В ОГ дизелей преобладают низкомолекулярные альдегиды – формальдегид H<sub>2</sub>CO, ацетальдегид H<sub>4</sub>C<sub>2</sub>O и акролеин H<sub>4</sub>C<sub>3</sub>O. Первые два представляют гомологический ряд насыщенных альдегидов, третий – ненасыщенных. В ОГ дизельных двигателей на долю формальдегида приходится 71 – 91 % от общего содержания альдегидов, на долю акролеина – 9 – 22 %. В целом в ОГ дизелей содержание альдегидов может достигать 30 мг/м<sup>3</sup>.

Кроме перечисленных токсичных компонентов в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания могут присутствовать фенолы, нитрофенолы, спирты, сложные эфиры и др.

Токсичные вещества, содержащиеся в ОГ тепловозных дизелей, являются в основном продуктами сгорания сжигаемых в камере сгорания видов топлива, поэтому токсичность ОГ зависит от качества применяемого топлива. Используемые в дизелях виды топлива представляют собой смесь индивидуальных углеводородов, имеющих различные физико-химические свойства. Причем в зависимости от происхождения нефти и технологии ее переработки состав товарных видов дизельного топлива и, следовательно, их физико-химические свойства могут быть различными. Это приводит к различиям экологических показателей дизелей, работающих на штатных видах дизельного топлива.

Среди свойств топлива значительное влияние на выбросы токсичных компонентов оказывают групповой углеводородный, фракционный и элементарный состав топлива, его моторные качества и физические свойства, содержание в топливе серы, химически связанного азота и присадок. Важнейшим свойством дизельного топлива является его самовоспламенение

## Подвижной состав железных дорог

няемость, определяющая пусковые свойства двигателя, жесткость рабочего процесса, расход топлива, токсичность и дымность ОГ. Самовоспламеняемость характеризуется температурой самовоспламенения – наименьшей температурой, при которой топливо воспламеняется без воздействия постороннего источника.

Основной показатель воспламеняемости топлива в условиях камеры сгорания дизеля – цетановое число (ЦЧ), зависящее от углеводородного состава топлива и диапазона температур его выкипания.

ЦЧ существенно влияет на эмиссию продуктов неполного сгорания топлива и дымность ОГ. Так, при плохой воспламеняемости топлива (низкое ЦЧ) наблюдаются выбросы черного (твердые частицы и сажа) и белого (газообразные углеводороды и мельчайшие капли несгоревшего топлива) дыма. Особенно заметны эти выбросы на переходных режимах работы дизеля (пусковые режимы, разгон). На начальной стадии переходных режимов в атмосферу выбрасывается смесь черного и белого дыма, а затем преобладает выброс белого дыма. Чем выше ЦЧ топлива, тем короче периоды дымления и меньше общий уровень дымности ОГ. Цетановое число предопределяет содержание в топливе ароматических углеводородов. Повышенное содержание ароматических углеводородов в топливе отрицательно сказывается на выбросах продуктов неполного сгорания – CO, CH<sub>x</sub>.

Фракционный состав топлива может оказывать заметное влияние на токсичность ОГ дизеля, в первую очередь – на эмиссию несгоревших углеводородов CH<sub>x</sub> и дымность ОГ. Наибольшая эмиссия CH<sub>x</sub> наблюдается при работе дизеля на топливе с легким фракционным составом, а наименьшая – с тяжелым. Токсичность ОГ дизелей зависит от содержания в топливе соединений серы. Наличие серы в топливе не оказывает заметного влияния на процесс сгорания, мощностные и экономические показатели двигателя, но в условиях камеры сгорания дизеля (температура, давление) она окисляется с образованием токсичных оксидов серы SO<sub>2</sub> и SO<sub>3</sub>. Выброс этих веществ как продуктов сгорания серы прямо пропорционален содержанию серы в топливе и не может быть скомпенсирован за счет улучшения качества процесса сгорания.

Определенное влияние на эмиссию оксидов азота в продуктах сгорания оказывают имеющиеся в нефтяном топливе азотосодержащие соединения, их концентрация в дизельном топливе достигает 1,5 – 2 % (по массе), а содержание азота – 0,2 %. В продуктах вторичной переработки нефти содержится значительно больше азота, чем в прямогонном топливе, поэтому при использовании дизельного топлива, содержащего эти продукты, добавочный выброс NO<sub>x</sub> за счет окисления азота топлива может достигать 5 – 15 %.

Наличие в топливе соединений кислорода благоприятно сказывается на эмиссии продуктов неполного сгорания топлива, в первую очередь углерода (сажи), поэтому одним из способов снижения дымности ОГ является добавление в топливо противодымных присадок, в качестве которых могут быть использованы кислородосодержащие вещества (спирты, вода). Применение таких присадок позволяет снизить эмиссию сажи в ОГ на 10 – 20 %.

Увеличение ЦЧ с помощью присадок [2] приводит к сокращению периода задержки воспламенения, снижению скорости нарастания давления и улучшению экономических, экологических и пусковых качеств дизеля. Вместе с тем применение присадок к топливу имеет ряд недостатков, главными из которых являются повышение стоимости топлива, нестабильность топлива с присадками при длительном хранении, неудобство снабжения нужными присадками в эксплуатации и токсичность ряда присадок, поэтому применение топливных присадок в локомотивном хозяйстве ОАО «РЖД» пока не получило массового распространения.

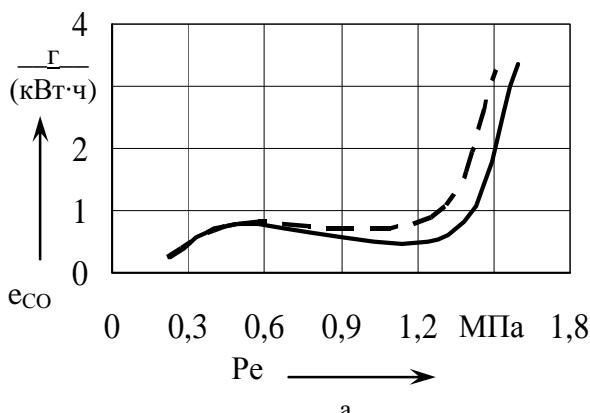
Экологические качества дизелей зависят и от физических свойств топлива, к числу которых относятся плотность и вязкость. Более низкая плотность и вязкость обеспечивают лучшее распыление топлива; с повышением указанных показателей качества увеличивается диаметр капель и ухудшается их сгорание, в результате чего повышаются удельный расход топлива и дымность ОГ.

Заметное влияние на токсичность ОГ оказывает наличие в топливе различных примесей

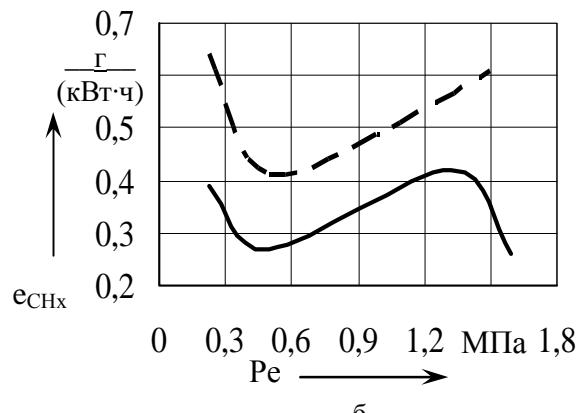
# Подвижной состав железных дорог

(воды, механических примесей, смолистых веществ). Чистоту топлива оценивают коэффициентом фильтруемости, зольностью топлива, йодным числом. Наличие этих примесей приводит к увеличению токсичности ОГ, в первую очередь – к росту эмиссии твердых частиц.

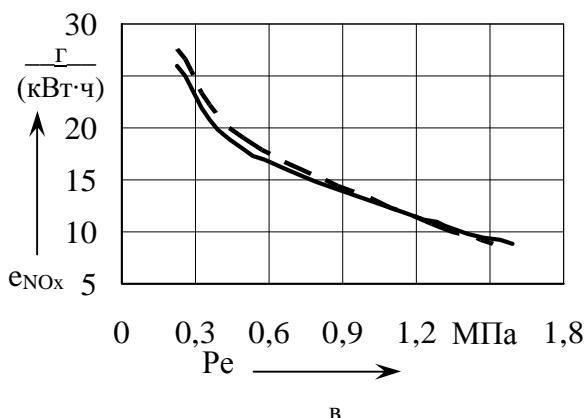
Топливная присадка «Лубризол 8411А» – многофункциональная присадка, предназначенная для улучшения процесса выгорания топлива в цилиндре дизеля, что уменьшает количество вредных выбросов в отработавших газах. Результаты сравнительного анализа экологической безопасности тепловозных дизелей типа 16ЧН26/26, работающих на дизельном топливе среднего элементарного состава с различным процентным количеством присадки «Лубризол 8411А» для различных режимов нагрузки, представлены на рисунке.



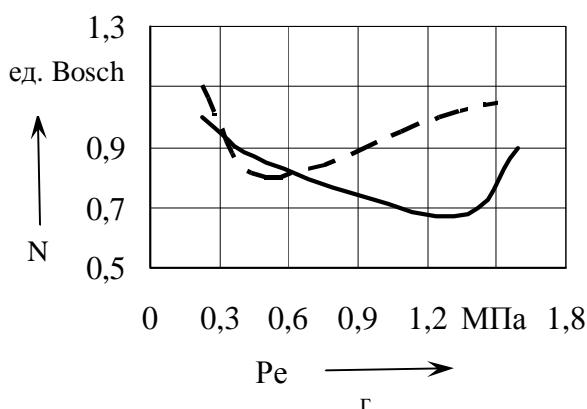
a



б



в



г

Зависимость количества вредных выбросов и дымности продуктов сгорания от среднего эффективного давления: - - - 0 % Пр., — — 0,09 % Пр

Анализ зависимостей, приведенных на рисунке, показывает, что на малых нагрузках двигателя, при низком значении среднего эффективного давления ( $P_e < 0,6$  МПа) снижения  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  в отработавших газах и дымности продуктов сгорания практически не наблюдается. Согласно рисунку применение присадки существенно снижает содержание в продуктах сгорания различных углеводородных соединений  $\text{CH}_x$ .

Увеличение количества присадки в топливе от 0 до 0,09 % практически не приводит к снижению количества  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания, но снижает их дымность (N) примерно на 30 %, уменьшает количество оксидов углерода (CO) примерно на 37 % и количество углеводородных соединений ( $\text{CH}_x$ ) – на 25 % (таблица).

При работе дизеля 16ЧН26/26 на номинальном режиме, при  $P_e = 1,6$  МПа, количество оксидов углерода ( $e_{\text{CO}}$ ) в отработавших газах снижается примерно на 44 %, количество углеводородных соединений ( $e_{\text{CH}_x}$ ) – на 42 %, дымность (N) продуктов сгорания уменьшается на 24 %, однако количество оксида азота ( $e_{\text{NO}_x}$ ), степень экологической опасности которых намного выше, чем у оксида азота, остается практически неизменным.

# Подвижной состав железных дорог

Результаты испытания дизеля при работе на различных видах топлива

Наименование параметра	Вид топлива	
	ДТ	ДТ+0,09%Пр
Частота вращения коленчатого вала дизеля $n$ , мин <sup>-1</sup>	996	991
Эффективная мощность дизеля $P_e$ , кВт	2635,6	2635,2
Удельный эффективный расход топлива $b_e$ , г/(кВт·ч)	221,1	222,2
Расход топлива $B_e$ , кг/ч	528,5	585,3
Расход газов (по углеродному балансу) $S$ , кг/ч	17365	17254,4
Удельный выброс $NO_x$ , г/(кВт·ч)	8,94	8,91
Удельный выброс $CO$ , г/(кВт·ч)	3,25	3,35
Удельный выброс $CH$ , г/(кВт·ч)	0,61	0,26
Дымность воздуха, ед. Bosch	1,05	0,9
Концентрация $CH$ , ppm	69	30
Концентрация $CO$ , ppm	510	530
Концентрация $NO_2$ , ppm	6	3
Концентрация $NO$ , ppm	849	854
Концентрация $CO_2$ , %	7,4	7,5
Средневзвешенный удельный выброс $NO_x$ , г/(кВт·ч)	12,13	11,66
Средневзвешенный удельный выброс $CO$ , г/(кВт·ч)	2,98	2,93
Средневзвешенный удельный выброс $CH$ , г/(кВт·ч)	0,6	0,31

Таким образом, предварительные исследования влияния присадки «Лубризол 8411А» на экологические параметры рабочего цикла показали, что неоднозначность изменения количества вредных выбросов в продуктах сгорания не позволяет без экономической оценки рекомендовать ее к применению в транспортных двигателях, время работы которых на малых нагрузках значительно. Кроме того, необходим анализ изменения величины расхода топлива, что позволит окончательно судить об экономической эффективности использования присадки «Лубризол 8411А» в тепловозных дизелях большой мощности.

## Список литературы

1. Носырев, Д. Я. Выбросы вредных веществ локомотивными установками: Монография [Текст] / Д. Я. Носырев, Е. А. Скачкова, А. Д. Росляков. – М.: Маршрут, 2006. – 248 с.
2. Башкатова, С. Т. Присадки к дизельным топливам [Текст] / С. Т. Башкатова. – М.: Химия, 1994. – 256 с.

---

УДК 629.42.07

А. В. Климович, А. А. Кообар, А. С. Ленясов

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОГО РЕГИСТРАТОРА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Предлагается методика определения удельного сопротивления движению поезда в выполненной поездке по данным электронного регистратора параметров движения, основанная на математической обработке графика движения  $v = f(s)$ . Практическое использование данной методики показало, что действительное удельное сопротивление движению грузовых поездов меньше рассчитанных по действующим Правилам тяговых расчетов примерно на 17–20 %.

# Подвижной состав железных дорог

Сопротивление движению поезда является одной из важнейших характеристик, определяющих затраты энергоресурсов на его перемещение. В теории тяги полное сопротивление движению поезда принято разделять на основное  $W_0$  и дополнительное  $W_d$ . К основному относят сопротивление движению поезда на прямом горизонтальном участке пути, образуемое из-за потерь энергии от трения в подшипниках колесных пар вагонов и локомотива, от качения колес по рельсам, от трения скольжения колес по рельсам, от ударов колес на стыках рельсов, от воздействия воздушной среды (аэродинамическое сопротивление). К дополнительному сопротивлению относят силы, возникающие при движении поезда на уклонах и от кривизны пути и действующие временно, только в пределах определенных элементов плана и профиля пути. Значение дополнительного сопротивления движению не зависит от скорости поезда и рассчитывается по рекомендациям Правил тяговых расчетов (ПТР) достаточно просто [1]. Известно, что на величину основного сопротивления движению в реальных условиях выполнения поездки существенное влияние оказывают различные случайные факторы, такие как погодные условия, индивидуальные особенности состава (масса, номенклатура, количество и последовательность расположения вагонов в поезде), наличие на открытых платформах грузов сложной аэродинамической формы и пр. Неформализуемые параметры движения, указанные выше, учесть расчетным путем не представляется возможным. Методика определения основного удельного сопротивления, рекомендуемая ПТР и полученная в результате обработки большого объема статистических данных, предполагает, что его зависимость от скорости представляет собой многочлен второй степени:

$$\omega(v) = a + bv + cv^2, \quad (1)$$

где  $a, b, c$  – постоянные коэффициенты.

Во Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТе) разработан расчетно-аналитический метод определения норм энергозатрат на тягу поездов [2], использующий рекомендуемые ПТР методики расчета сопротивления движению и основанный на имитационном (компьютерном) моделировании движения поезда с учетом фактических его параметров и условий движения. Порядок расчета по указанному методу разделяется на семь основных этапов. Для конкретного поезда по данным маршрутного листа машиниста определяются временные характеристики выполнения поездки. Далее строятся энергооптимальная и графовая траектории, обеспечивающие движение поезда от начальной до конечной станции за время, указанное в маршрутном листе с учетом выполнения всех ограничений скорости во время поездки, а также выполнения всех времен проследования промежуточных станций и неграфиковых остановок по маршрутному листу. Для построенных траекторий рассчитывается соответствующая им механическая работа на поездку:  $A_{\text{опт}} -$  минимальная и  $A_{\text{гр}} -$  максимальная.

Далее определяются потери в локомотиве  $\Delta A$ . Для их расчета во ВНИИЖТе построены специальные таблицы потерь в силовых цепях локомотива в зависимости от скорости поезда и реализуемой тяговой силы. Расход на собственные нужды рассчитывается по мощности вспомогательных машин из условия 50 % времени работы компрессоров в режиме тяги и выбега и 25 % времени их работы на стоянке. Тогда суммарные расходы в поездке для оптимальной и графовой траекторий движения могут быть найдены по формулам:

$$A_{\text{опт}} = A_{\text{опт}} + \Delta A; \quad (2)$$

$$A_{\text{гр}} = A_{\text{гр}} + \Delta A. \quad (3)$$

Суммарный расход топливно-энергетических ресурсов определяется добавлением к полученным выше энергозатратам дополнительных служебных расходов в период от начала приемки состава до момента отправления с начальной станции и в период от момента прибытия на конечную станцию до момента окончания сдачи локомотива. Последние определя-

# Подвижной состав железных дорог

ются расходом на собственные нужды локомотива за соответствующее время, вычисляемое по маршрутному листу. Норму расхода на рассматриваемом маршруте рекомендуется выбирать как среднее значение между оптимальным и графиковым расходом топливно-энергетических ресурсов.

Был выполнен расчет удельных затрат электроэнергии на тягу грузовых поездов для участка Входная – Иртышская (четное направление) Западно-Сибирской железной дороги в предположении, что их основное и дополнительное сопротивления движению соответствуют рассчитанным по правилам ПТР. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет норм расхода электроэнергии на тягу поездов грузового движения для направления Входная – Иртышская (кВт·ч/10<sup>4</sup> ткм брутто)

Масса, т	Техническая скорость, км/ч	Разгон			Проба тормозов				
		путь, м	время, с	затраты энергии, кВт·ч	путь торможения, м	время торможения, с	путь разгона, м	время разгона, с	затраты энергии, кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1970	68	1243	118	175	505	30	750	42	77
3320	66,75	1837	182	270	474	29	900	54	114
4424	65,5	2323	236	349	454	28	1180	73	155
5400	64,25	2725	282	415	430	26	1240	78	160
6333	63	3007	322	467	387	24	1260	81	170

Окончание таблицы 1

Торможение				Установившееся движение				Затраты от профиля пути, кВт·ч	Общие затраты энергии, кВт·ч	Удельные затраты, кВт·ч/изм
путь выбега, м	время выбега, с	путь торможения, м	время торможения, с	путь, км	время, ч	ходовая скорость, км/ч	затраты энергии, кВт·ч			
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
3858	259	273	45	157,4	2,27	69,18	4805	-1,47	5056	156,5
5376	365	280	46	155,1	2,27	68,37	4814	-2,38	5196	95,4
6388	437	283	46	153,4	2,28	67,38	4869	-3,14	5370	74,0
7089	488	284	46	152,2	2,30	66,28	4910	-3,80	5481	61,9
7416	517	286	46	151,6	2,33	65,14	4990	-4,44	5623	54,1

Удельные затраты определены для поездов с различной нагрузкой на ось (5, 6, 10, 14, 18 и 22,3 т соответственно). Техническая скорость для поездов массой 1970 и 6333 т принята среднестатистическая, а для остальных линейно аппроксимирована. Отрицательные значения затрат энергии на преодоление дополнительного сопротивления движению поездов (см. 19-й столбец в таблице 1) объясняются соответствующим планом и профилем пути участка: ст. Иртышская расположена по профилю ниже ст. Входная на 2,9 м. Погодные условия не учитывались. Расчет выполнен с учетом потерь в электровозе, но без учета дополнительных служебных энергозатрат в период от начала приемки состава до момента отправления с начальной станции и в период от момента прибытия на конечную станцию до момента окончания сдачи локомотива. График движения поездов принят энергооптимальный без дополнительных неграфиковых остановок, рекуперация не применялась. Выполнение пробы тормозов предполагалось в соответствии с действующей на Западно-Сибирской железной дороге инструкцией.

# Подвижной состав железных дорог

Сравнивая полученные расчетные удельные затраты со среднестатистическими для указанного выше направления движения, отметим, что последние на 10 – 12 % меньше расчетных. Объяснить полученный результат можно только одной причиной: расчетные энергозатраты на тягу получены для основного удельного сопротивления движению, отличающегося от реально имевшего место в рассматриваемых поездках. Следовательно, методика расчета основного сопротивления движению грузового поезда, рекомендованная ПТР, дает несколько завышенное значение в сравнении с реально действовавшим. В такой ситуации расчетно-аналитическому методу анализа расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу, разработанному ВНИИЖТом, доверять нельзя, так как он использует расчетные формулы ПТР, что приводит к минимальной погрешности в 10 – 12 %.

Между тем, на скоростемерных лентах и в базе данных электронного регистратора параметров движения (ЭРПД) всегда фиксируется зависимость  $v = f(s)$ , отражающая действие всех сил на поезд во время движения. В ЭРПД эта информация представлена в цифровом виде и удобна для обработки. Зависимость силы основного сопротивления движению от скорости реального поезда в выполненной поездке можно определить, исследовав участок выбега графика движения  $v = f(s)$ . Режим выбега – достаточно распространенный режим движения поезда. К этому режиму машинисты прибегают перед торможением, при регулировке скорости на затяжных спусках. Статистические данные показывают [3], что при перевалистом профиле примерно на 21 – 35 %, а при равнинном – на 13 – 35 % пути машинист применяет режим выбега. При выбеге на поезд действуют только силы основного и дополнительного сопротивления движению. Если выбранный участок произвольно разбивается на три интервала и для каждого определяются длина ( $l_j$ ), скорость поезда в начале ( $v_{hj}$ ) и в конце ( $v_{kj}$ ) участка разбиения, можно записать следующую систему трех уравнений:

$$\begin{cases} A_{o1} = \frac{v_{h1}^2 - v_{k1}^2}{2} - A_{d1}; \\ A_{o2} = \frac{v_{h2}^2 - v_{k2}^2}{2} - A_{d2}; \\ A_{o3} = \frac{v_{h3}^2 - v_{k3}^2}{2} - A_{d3}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $A_{o1}, A_{o2}, A_{o3}, A_{d1}, A_{d2}, A_{d3}$  – работа удельных сил основного и дополнительного сопротивления движению поезда соответственно на первом, втором и третьем участках разбиения в  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}$ .

В системе уравнений (4) учтен знак указанных работ при рассматриваемом режиме движения поезда.

Так как длина участков разбиения обычно соизмерима с длиной поезда  $l_n$ , работу удельной силы дополнительного сопротивления от уклонов, по абсолютной величине равную изменению удельной потенциальной энергии поезда, следует определять с учетом распределения массы поезда по его длине. Если принять равномерное распределение груза по длине рассматриваемого поезда, то его погонная масса будет  $\mu = \frac{m_n}{l_n}$ . Рассмотрим случай, приведенный на рисунке 1, когда длина первого участка разбиения равна  $l_1$ . Здесь  $s_{hb}$  – координата начала участка выбега по зависимости  $v = f(s)$ ;  $s_k, s_{k+1}$  и  $s_{k+2}$  – координаты начала соответственно  $k$ -го,  $(k+1)$ -го и  $(k+2)$ -го спусков;  $l_{ik}$  и  $l_{ik+1}$  – протяженности  $k$ -го и  $(k+1)$ -го спусков;  $y_c$  и  $y_{c1}$  – вертикальные координаты центра масс поезда при его расположении в начале и в конце первого участка разбиения в произвольно выбранной системе координат  $xOy$ .

# Подвижной состав железных дорог

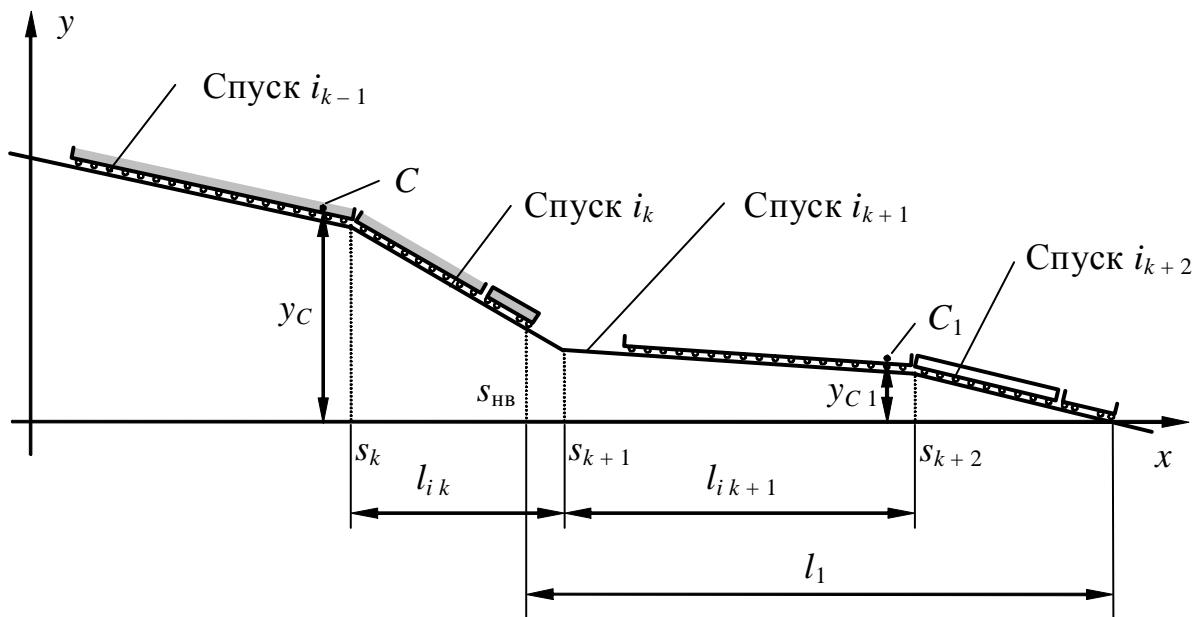


Рисунок 1 – К определению изменения потенциальной энергии поезда при его движении по нескольким уклонам

Работу удельной силы дополнительного сопротивления от уклонов (изменение удельной потенциальной энергии центра масс поезда) в рассматриваемом случае можно найти по выражению:

$$A_{\partial 1} = \frac{1}{m_n} g(y_C - y_{C1}) m_n = \frac{g}{m_n} (S_x - S_{x1}), \quad (5)$$

где  $S_x$  и  $S_{x1}$  – статические моменты массы поезда относительно оси  $x$  при расположении его головы в начале и в конце первого участка разбиения:

$$S_x = \mu(s_{HB} - s_k)[(s_{HB} + l_1)i_{k+2} + l_{ik+1}i_{k+1} + (s_{k+1} - s_{HB} + \frac{s_{HB} - s_k}{2})i_k] + \mu(l_n - s_{HB} + s_k) \times \\ \times [(s_{HB} + l_1)i_{k+2} + l_{ik+1}i_{k+1} + l_{ik}i_k + \frac{l_n - s_{HB} + s_k}{2}i_{k-1}]; \quad (6)$$

$$S_{x1} = \mu(s_{HB} + l_1 - s_{k+2}) \frac{s_{HB} + l_1 - s_{k+2}}{2} i_{k+2} + \mu(l_n - s_{HB} - l_1 + s_{k+2}) \times \\ \times [(s_{HB} + l_1 - s_{k+2})i_{k+2} + \frac{l_n - s_{HB} - l_1 + s_{k+2}}{2}i_{k+1}]. \quad (7)$$

Заметим, что при принятом в теории тяги поездов правиле знаков для уклонов (для подъема – плюс, для спуска – минус) в рассмотренном примере работа удельной силы дополнительного сопротивления будет отрицательна. Действие дополнительного сопротивления движению от кривой определяется аналогично после замены последней эквивалентным подъемом по методике, рекомендованной ПТР.

Работу удельных сил основного сопротивления движению приближенно можно оценить по формуле:

$$A_{o,j} = \omega_{cp,j} l_j \approx \frac{\int_{v_{kj}}^{v_{nj}} (a + bv + cv^2) dv}{v_{nj} - v_{kj}} l_j = \left[ a + b \frac{(v_{kj} + v_{nj})}{2} + c \frac{(v_{kj}^2 + v_{nj}v_{kj} + v_{nj}^2)}{3} \right] l_j, \quad (8)$$

# Подвижной состав железных дорог

где  $\omega(s)$  – зависимость основного удельного сопротивления движению поезда от пройденного пути;  $\omega_{cp,j}$  – среднее значение удельного сопротивления движению поезда на  $j$ -м элементе разбиения, полученное по зависимости  $\omega(s)$ .

Подставляя выражение (8) в систему уравнений (4), получаем систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} a + b \frac{(v_{k1} + v_{h1})}{2} + c \frac{(v_{k1}^2 + v_{h1}v_{k1} + v_{h1}^2)}{3} = \frac{v_{h1}^2 - v_{k1}^2}{2l_1} - \frac{A_{d1}}{l_1}; \\ a + b \frac{(v_{k2} + v_{h2})}{2} + c \frac{(v_{k2}^2 + v_{h2}v_{k2} + v_{h2}^2)}{3} = \frac{v_{h2}^2 - v_{k2}^2}{2l_2} - \frac{A_{d2}}{l_2}; \\ a + b \frac{(v_{k3} + v_{h3})}{2} + c \frac{(v_{k3}^2 + v_{h3}v_{k3} + v_{h3}^2)}{3} = \frac{v_{h3}^2 - v_{k3}^2}{2l_3} - \frac{A_{d3}}{l_3}. \end{cases} \quad (9)$$

Решая систему уравнений (9), получаем коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  зависимости удельного сопротивления движению от скорости исследуемого поезда в пределах выбранного участка выбега. При этом учитываем, что система не имеет решения, если определитель системы

$$\begin{vmatrix} 1 & \frac{(v_{k1} + v_{h1})}{2} & \frac{(v_{k1}^2 + v_{h1}v_{k1} + v_{h1}^2)}{3} \\ 1 & \frac{(v_{k2} + v_{h2})}{2} & \frac{(v_{k2}^2 + v_{h2}v_{k2} + v_{h2}^2)}{3} \\ 1 & \frac{(v_{k3} + v_{h3})}{2} & \frac{(v_{k3}^2 + v_{h3}v_{k3} + v_{h3}^2)}{3} \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$

Обозначив  $v_{h1} = V1$ ;  $v_{k1} = v_{h2} = V2$ ;  $v_{k2} = v_{h3} = V3$ ;  $v_{k3} = V4$ , перепишем определитель в виде:

$$\begin{vmatrix} 1 & \frac{V1+V2}{2} & \frac{V1^2 + V1 \cdot V2 + V2^2}{3} \\ 1 & \frac{V2+V3}{2} & \frac{V2^2 + V2 \cdot V3 + V3^2}{3} \\ 1 & \frac{V3+V4}{2} & \frac{V3^2 + V3 \cdot V4 + V4^2}{3} \end{vmatrix} = 0. \quad (11)$$

В системе уравнений (9), вычитая из первого уравнения второе, а из второго – третье, определяем условие, когда система (9) не имеет решения:

$$\frac{(V1-V3)(V2-V4)(V4-V1)}{6} = 0. \quad (12)$$

Следовательно, для получения решаемой системы участки разбиения следует выбирать в соответствии со следующим ограничением:

$$V1 \neq V3; \quad V2 \neq V4; \quad V1 \neq V4. \quad (13)$$

Точность расчета существенно зависит от общей длины участка выбега. При недостаточной его длине либо при некоторой неизбежной неточности исходных данных решение системы уравнений (9) имеет некоторую погрешность. Здесь имеет место эффект, подобный

# Подвижной состав железных дорог

эффекту, возникающему при интерполяции любым известным методов ( $n + 1$ ) парных значений  $(x_i, y_i)$ . Получаемая интерполяционная формула  $Y(x)$  обычно дает вполне удовлетворительные значения функции для значений аргумента, лежащих на отрезке  $(x_0, x_n)$ . За пределами указанного отрезка интерполяционной формулой  $Y(x)$  пользоваться не рекомендуется из-за непредсказуемости получаемых результатов.

Если рассчитанная по методике ПТР зависимость основного удельного сопротивления движению исследуемого поезда от скорости (1) имеет коэффициенты  $a_{\text{ппр}}$ ,  $b_{\text{ппр}}$  и  $c_{\text{ппр}}$ , то в рассматриваемой задаче полученные при решении системы уравнений (9) коэффициенты рекомендуется скорректировать при помощи следующих расчетных формул:

$$c_o = \frac{3(b_{\text{ппр}}^2 - 4a_{\text{ппр}}c_{\text{ппр}}) + (12c_{\text{ппр}}a) + 6c_{\text{ппр}}b(B - A) + 4c_{\text{ппр}}c(B^2 + AB + A^2)}{\left(\frac{3b_{\text{ппр}}^2}{c_{\text{ппр}}}\right) + 6b_{\text{ппр}}(B + A) + 4c_{\text{ппр}}(B^2 + AB + A^2)}; \quad (14)$$

$$b_o = \frac{b_{\text{ппр}}}{c_{\text{ппр}}} c_o; \quad (15)$$

$$a_o = a_{\text{ппр}} - \frac{b_{\text{ппр}}^2}{4c_{\text{ппр}}} + \frac{b_{\text{ппр}}^2}{4c_{\text{ппр}}^2} c_o, \quad (16)$$

где  $A, B$  – скорость в начале и в конце исследуемого участка выбега;  $a_o, b_o, c_o$  – скорректированные искомые коэффициенты.

Рассмотренная методика была опробована при анализе исполненных графиков движения грузовых поездов, оборудованных ЭРПД и проследовавших по участкам Иртышская – Входная (пять поездов), Барабинск – Московка (19 поездов) и Московка – Ишим (один поезд) Западно-Сибирской железной дороги в апреле, мае 2005 г. Информация получена с кассет регистрации комплексных локомотивных устройств безопасности КЛУБ-У, обработанных с помощью системы дешифрации СУД-5. Сопротивление движению уточнялось по рассмотренной методике на участке выбега непосредственно перед пробой тормозов в диапазоне скоростей от 70 до 60 км/ч. Погрешность расчетного выбега относительно фактического в пределах исследуемого участка не превышает 1%. Краткая характеристика поездов и их основное сопротивление движению представлены в таблице 2. Зависимости удельного сопротивления, определенные по ПТР и уточненные, приведены на рисунке 2.

Таблица 2 – Краткая характеристика и основное удельное сопротивление движению рассмотренной группы поездов

Номер поезда	Дата, число, месяц поездки	Масса поезда, т	Число осей поезда	Удельное сопротивление движению, кгс/т*, при скорости, км/ч					
				по ПТР			уточченное		
				40	60	80	40	60	80
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2013	06.04	6236	284	1,261	1,593	2,021	1,263	1,599	2,030
2137	06.04	5899	260	1,249	1,573	1,990	1,006	1,144	1,321
2160	06.04	4529	264	1,416	1,839	2,382	1,415	1,836	2,377
2465	06.04	6238	280	1,253	1,581	2,002	0,919	0,985	1,070
2001	07.04	5177	300	1,404	1,823	2,363	1,410	1,832	2,374
2009	07.04	5051	272	1,362	1,754	2,257	1,077	1,246	1,463

# Подвижной состав железных дорог

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2123	09.04	6114	280	1,266	1,601	2,033	1,129	1,356	1,626
2337	11.04	6226	280	1,257	1,586	2,011	0,949	1,035	1,146
2131	11.04	5855	268	1,269	1,604	2,036	0,911	0,967	1,040
2377	11.04	5048	272	1,362	1,754	2,257	1,038	1,178	1,357
2421	11.04	6365	284	1,251	1,578	1,999	1,195	1,478	1,842
2315	12.04	2111	274	2,225	3,128	4,289	2,07	2,852	3,858
2487	14.04	6394	284	1,248	1,572	1,980	1,273	1,618	2,061
2137	16.04	6290	272	1,238	1,556	1,966	1,195	1,480	1,847
2327	16.04	4091	264	1,491	1,958	2,559	1,355	1,716	2,182
2337	16.04	5887	280	1,288	1,637	2,086	0,954	1,041	1,151
2039	17.04	6161	280	1,196	1,514	1,959	0,971	1,063	1,191
2303	19.04	5521	276	1,317	1,683	2,154	1,470	2,071	2,904
2129	21.04	4634	284	1,196	1,514	1,959	0,971	1,063	1,191
2345	21.04	3295	256	1,646	2,202	2,918	1,121	1,269	1,460
2363	21.04	3694	240	1,505	1,977	2,584	1,004	1,085	1,189
2015	21.04	6074	288	1,283	1,630	2,075	1,014	1,151	1,327
2361	22.04	4658	268	1,170	1,469	1,888	0,888	0,904	0,926
2491	25.04	6634	292	1,242	1,563	1,977	1,189	1,549	2,012
2471	05.05	2537	268	1,957	2,700	3,656	1,455	1,806	2,258

\* Единицы измерения указаны в соответствии с принятой системой размерностей действующих ПТР.

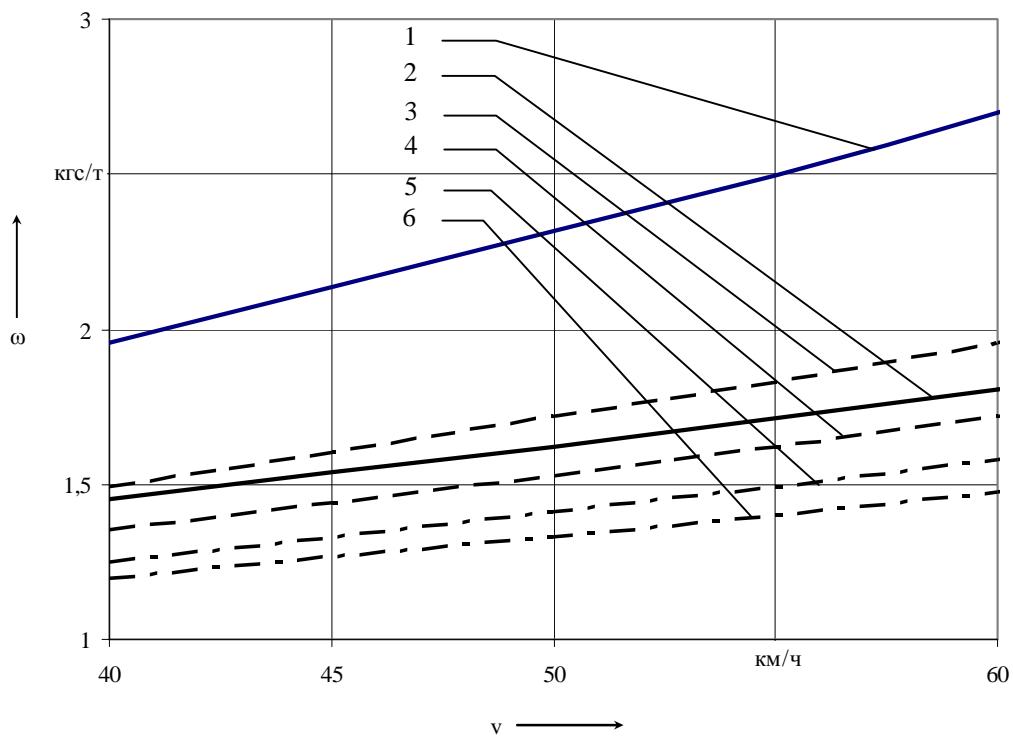


Рисунок 2 – Вид зависимостей основного удельного сопротивления движению от скорости:

- 1 – масса поезда – 2537 т, 268 осей по ПТР; 2 – масса поезда – 2537 т, 268 осей (уточненное);
- 3 – масса поезда – 4091 т, 264 оси по ПТР; 4 – масса поезда – 4091 т, 264 оси (уточненное); 5 – мас-са поезда – 6365 т, 284 оси по ПТР; 6 – масса поезда – 6365 т, 284 оси (уточненное)

Значения расчетного удельного сопротивления движению поездов были обработаны известными в математической статистике методами. Результаты обработки приведены в таблице 3. В соответствии с приведенными данными в реальных эксплуатационных условиях имевшее место сопротивление движению грузового поезда при скоростях, близких к ходовой

# Подвижной состав железных дорог

скорости, обычно меньше рассчитанного по ПТР на 17 – 20 %. К сожалению, установить причины такого значительного отклонения реального сопротивления движению поезда от расчетного затруднительно. Частично полученные результаты можно объяснить тем, что за 25 лет с момента утверждения действующих ПТР вагонный парк существенно обновился, изменились и типы масел, используемых в подвижном составе.

Таблица 3 – Сравнение удельного сопротивления движению грузовых поездов, рассчитанного по правилам ПТР и определенного в результате анализа исполненных графиков движения

Скорость движения, км/ч	Математическое ожидание отклонения $\Delta\omega = \omega_{\text{ПТР}} - \omega_y$	Математическое ожидание $\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{ПТР}}} \cdot 100, \%$	Среднее квадратическое отклонение величины $\Delta\omega$	Среднее квадратическое отклонение величины $\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{ПТР}}} \cdot 100, \%$
40	0,2044	14,7	0,1758	12,2
50	0,2778	17,7	0,2455	15,1
60	0,3628	20,3	0,3281	17,9
70	0,4594	22,6	0,4238	20,5
80	0,5675	24,7	0,5328	22,8
90	0,6873	26,4	0,6550	24,9

Выполненные исследования показывают, что методика расчета основного удельного сопротивления движению поездов, рекомендованная ПТР, явно устарела и требует уточнения. Применение рассмотренной в статье методики определения реально действовавшего сопротивления движению в выполненной поездке по исполненному графику движения поезда позволит накопить необходимую статистическую информацию без дорогостоящих экспериментальных поездок с динамометрическим вагоном. Определение действительного сопротивления движению поезда следует считать целесообразным при анализе энергозатрат на тягу, так как его величина позволяет объективно оценивать работу локомотивных бригад в направлении снижения электропотребления при выполнении перевозочной работы.

## Список литературы

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
2. О нормировании и анализе расхода топливно-энергетических ресурсов в депо [Текст] / Л. А. Мугинштейн, А. В. Лохач // Локомотив. – 2002. – № 3. – С. 35 – 37.
3. Бакланов, А. А. Применение методов теории вероятностей для определения расхода энергии на преодоление основного сопротивления движению поезда [Текст] / А. А. Бакланов, Р. Я. Медлин // Исследование тягово-энергетических показателей электроподвижного состава: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1981. – С. 91 – 95.

УДК 621.336:574

О. А. Сидоров, К. С. Маркелова, Б. В. Мусаткина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКОПРИЕМНИКОВ МОНОРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

Наиболее значимым фактором в общем химическом загрязнении городской среды устройствами токосъема монорельсового транспорта является повышенная концентрация в воздухе мелкодисперсных компонентов износа контактных элементов. Прогноз количества поступления продуктов износа в окружающую среду осуществлен на основе результатов экспериментальных исследований контактных пар в Омском государственном университете путей сообщения. Ожидаемые величины концентраций загрязняющих веществ определены по нормативному документу ОНД-86 «Методика расчета концентраций в атмосфере»

# Подвижной состав железных дорог

воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий». Полученные результаты могут быть использованы для оценки риска химического загрязнения среды обитания. Авторами предложена полезная модель токоприемника транспортного средства с улучшенными экологическими характеристиками, позволяющая снизить вынос продуктов износа контактных элементов в окружающую среду.

В настоящее время вклад устройств токосъема электрического транспорта в общее загрязнение окружающей среды железнодорожным транспортом учитывается недостаточно. Модернизация устройств токосъема связана с появлением новых материалов, в состав которых могут входить токсичные вещества. Именно поэтому нужна методика, позволяющая оценить интенсивность и характер выноса продуктов из зоны скользящего контакта, изучить их распространение в атмосферном воздухе, осаждение в почве и водоемах с последующим анализом их опасности для человека и среды его обитания.

Оценить вклад устройств токосъема в загрязнение окружающей среды можно на примере Московской монорельсовой транспортной системы (ММТС), которая не имеет полосы отвода и санитарно-защитной зоны, а проходит через центр столицы и имеет пересечение с другими видами наземного транспорта.

Анализ содержания металлов и их соединений по традиционным методикам в образцах почвы и воды, взятых в полосе отвода ММТС, не дает комплексной картины загрязнения окружающей среды продуктами износа контактных элементов.

Во-первых, непосредственно в полосе отвода осаждается только часть продуктов износа (крупнодисперсные сегменты с размером частиц до 300 мкм); мелкодисперсные частицы разносятся как аэродинамическими потоками, создаваемыми подвижным составом ММТС и другими транспортными средствами, так и естественными ветровыми воздействиями.

Во-вторых, попадающие в грунтовые воды и атмосферные сточные воды при таянии осадков продукты износа загрязняют водные объекты на значительных территориях.

В-третьих, трасса ММТС является стационарным линейным источником химического загрязнения, постоянно генерирующим поступление экологически опасных веществ в окружающую среду с их последующим осаждением и накоплением в почве.

В-четвертых, совершение устройств токосъема неизбежно связано с появлением новых материалов для контактных элементов токоприемников и контактных подвесок. Кроме традиционных (медь, уголь, металлокерамика) появляются различные материалы и их композиты, состав которых может иметь токсичные свойства и может вступать в промежуточные соединения с элементами почвы, атмосферного воздуха и воды и включаться в пищевые цепи живых организмов и человека. Взаимодействие продуктов износа с уже имеющимися фоновыми загрязнителями урбанизированных территорий, кислотным и биохимическим составом почвы и воды под воздействием солнечной радиации может привести к негативным сложно прогнозируемым последствиям для среды обитания.

В-пятых, при износе элементов токосъема идет выброс в окружающую среду как крупнодисперсных частиц металла (до 300 мкм), так и средне- и мелкодисперсных (до 10 мкм), образующих пылевой аэрозоль (дисперсную систему, состоящую из газовой среды – воздух, в которой взвешены твердые частицы). Воздействие пылевых аэрозолей на организм человека зависит от концентрации пыли в воздухе, времени пребывания человека в загрязненной воздушной среде и структуры пыли. Чем мельче частицы, тем дольше они находятся в воздухе и тем глубже в процессе дыхания проникают в организм человека. Форма пылевых частиц обуславливает скорость их оседания и степень вредного воздействия. Пылевые частицы с зазубренными острыми краями (металлическая пыль) оседают медленнее и в большем количестве попадают в дыхательные пути, травмируя при этом слизистые оболочки. Электрически заряженные частицы металлической пыли, образующиеся при токосъеме, захватываются организмом в два – три раза интенсивнее, чем электрически нейтральные, кроме того, частицы, несущие электрический заряд, агрессивны по отношению к внутренним органам человека.

# Подвижной состав железных дорог

Современная методология оценки экологического риска, предназначенная для оценки многосредовых воздействий и комплексного поступления химических веществ, характеризуется максимальным учетом множества источников, маршрутов и путей воздействия, разнообразных критериев эффекта (рисунок 1).

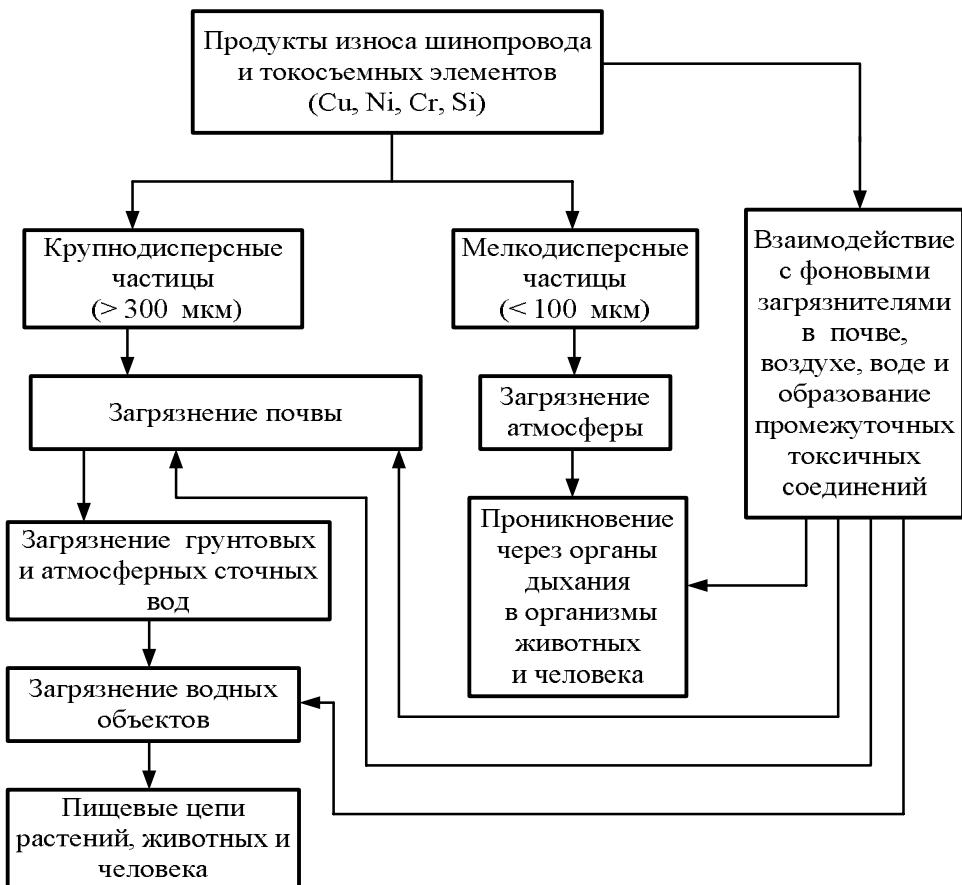


Рисунок 1 – Пути поступления загрязнений в окружающую среду при выносе продуктов трения из зоны контакта в процессе токосъема

С учетом изложенного выше экологическую оценку загрязнения окружающей среды устройствами токосъема целесообразно проводить с учетом количественного и качественного состава веществ, подвергшихся износу в процессе токосъема.

Наиболее значимым фактором в общем химическом загрязнении окружающей среды устройствами токосъема ММТС является повышенная концентрация в воздухе мелкодисперсных компонентов износа контактных элементов, так как, во-первых, почвы вдоль трассы не используются как сельскохозяйственные угодья; во-вторых, очистка воды питьевого назначения производится в целях соблюдения предельно допустимой концентрации (ПДК) содержащихся примесей.

Прогноз количества поступления продуктов износа в окружающую среду можно осуществить, зная удельную интенсивность износа элементов токосъема при различных усилиях нажатия, длину пути трения этих элементов, график движения ММТС, качественный и количественный химический состав токосъемных элементов.

Рассчитать ожидаемую концентрацию содержания продуктов износа контактных элементов устройств токосъема в атмосферном воздухе можно, используя полученные в ОмГУПСе результаты экспериментальных исследований процесса токосъема монорельсового транспорта [1], в соответствии с указаниями ОНД-86 «Методика расчета

# Подвижной состав железных дорог

концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» [6].

Общие технико-эксплуатационные характеристики ММТС, используемые в расчетах:

- длина плеча трассы – 4700 м;
- время работы – с 7:00 до 23:00 (16 часов в сутки);
- количество рейсов в сутки согласно расписанию – 88;
- средняя скорость движения – до 40 км/ч;
- количество токоприемников в одном электроподвижном составе (ЭПС) – 5; каждый токоприемник содержит по шесть токосъемных элементов из меди; количество токосъемных элементов в одном составе – 30;
- количество шинопроводов из бронзы марки «БрНХ» на плече трассы – 3 («+», «-», «земля»);
- при движении ЭПС токосъем по каждому из трех шинопроводов осуществляется десятью токосъемными элементами;

В экспериментальных исследованиях контактных пар в лаборатории «Контактные сети и линии электропередач» ОмГУПСа испытывались шинопровод из бронзы марки «БрНХ» и токосъемный элемент из меди (рисунок 2) при нажатии в контакте от 5 до 70 Н.

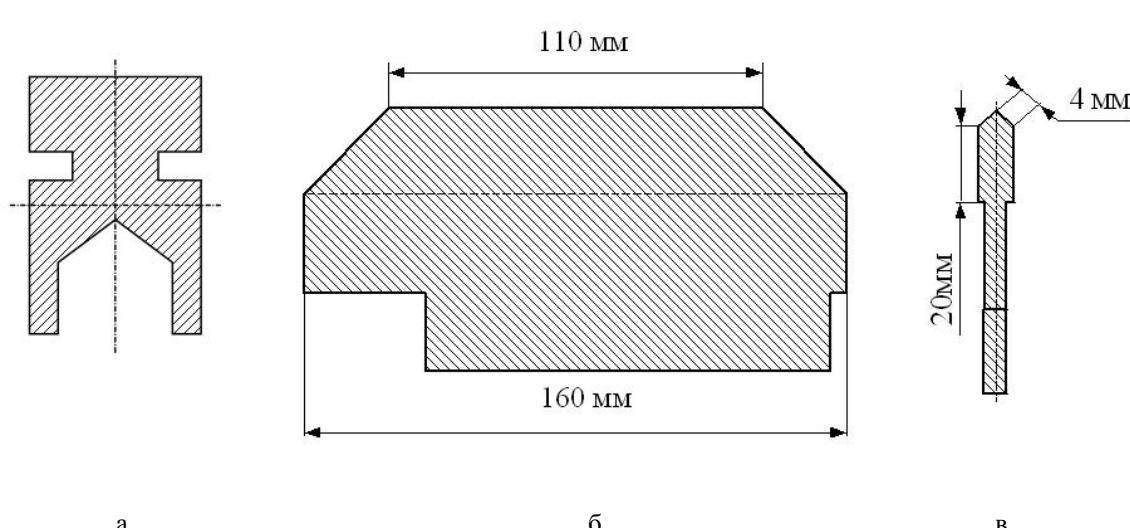


Рисунок 2 – Контактная пара ММТС (сечение): а – шинопровод; б – токосъемный элемент (вид сбоку); в – токосъемный элемент (сечение)

Установлено, что нажатие в 35 Н является недостаточным для обеспечения надежного токосъема, так как на длине 1000 м наблюдается девять случаев скачкообразного падения нажатия до нулевого значения с вероятностью возникновения радиопомех (искрения и электроэрозии), равной единице. Аналогичный опыт при рекомендуемом ОмГУПСом нажатии в 48 Н показал, что износ контактной пары увеличится на 51 %, но случаев отрывов и возникновения электромагнитных помех от искрения не наблюдается. Кривые зависимости износа от нажатия в контакте имеют характер, близкий к линейному [1]. Следовательно, зависимость интенсивности выноса загрязняющих веществ из зоны контакта от нажатия также будет носить приближенно линейный характер.

Выбор граничных условий – нажатия в 35 и 48 Н – для дальнейших расчетов и оценок основан на комплексном анализе воздействия устройств токосъема ММТС на окружающую среду: при нажатии в 35 Н износ и выброс продуктов трения в контакте минимальны, но повышенна интенсивность электромагнитных, ультрафиолетовых, оптических излучений вследствие искрения; при нажатии в 48 Н увеличивается износ, но минимизируется электромагнитное загрязнение территории вдоль трассы.

# Подвижной состав железных дорог

Показатели износа контактных пар «БрНХ – медь» на основании результатов экспериментальных исследований, проведенных в ОмГУПСе, с поправкой на существующую интенсивность движения состава ММТС согласно расписанию отправления и прибытия, приведены в таблице 1. Под удельным износом контактных пар  $Y$ , нм/м, понимается уменьшение вертикальных сечений шинопровода и токосъемного элемента вследствие истирания при прохождении ими пути трения длиной в 1 м.

Таблица 1 – Удельный износ контактных пар «БрНХ – медь» при существующей интенсивности движения ММТС

Усилие нажатия	Средний удельный износ шинопровода БрНХ $Y_{ш\_ср}$ , нм/м	Средний удельный износ токосъемного элемента из меди $Y_{т\_ср}$ , нм/м
35Н	0,200	0,283
48Н	0,308	0,434

Произведем расчеты потери массы шинопроводов и токосъемных элементов вследствие износа при усилиях нажатия в 35 и 48 Н.

В расчетах принимаются следующие допущения:

средние значения интенсивности удельного износа шинопровода и токосъемного элемента, без учета влияния разгона и торможения состава ММТС и изменения скорости и потребляемого тока соответственно;

равномерность износа по площади контакта;

средняя длина одного токосъемного элемента (см. рисунок 2, б, в) равна 0,130 м, так как при допустимом вертикальном износе до 0,020 м длина линии контакта меняется от 0,110 до 0,160 м.

Определим потерю массы шинопровода, кг, вследствие износа при прохождении одного состава ММТС:

$$M_{изн\_ш} = Y_{ш} \cdot l_{путь\_тр\_ш} \cdot S_{конт\_ш} \cdot \rho_{ш}, \quad (1)$$

где  $Y_{ш}$  – средний удельный износ шинопровода, нм/м (см. таблицу 1);

$l_{путь\_тр\_ш}$  – длина пути трения шинопровода. Каждая точка шинопровода относительно одного неподвижного состава ММТС пройдет путь трения  $0,13 \cdot 10 = 1,3$  м;

$S_{конт\_ш}$  – площадь контакта шинопровода с токосъемными элементами (см. рисунок 2), что составит  $0,004 \cdot 2 \cdot 4700 = 37,6 \text{ м}^2$ ;

$\rho_{ш}$  – плотность материала шинопровода из бронзы, что составит  $8,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Для нажатия в 35 Н масса продуктов износа одного шинопровода при прохождении одного состава ММТС

$$M_{изн\_ш} = 0,200 \cdot 10^{-9} \cdot 1,3 \cdot 37,6 \cdot 8,85 \cdot 10^3 = 8,652 \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

Суммарная масса выноса продуктов износа шести шинопроводов за 88 рейсов в сутки вдоль трассы ММТС

$$M_{изн\_ш\_сут} = 8,652 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 88 = 4,568 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$$

Суммарная масса выноса продуктов износа шинопроводов в течение года вдоль трассы

$$M_{изн\_ш\_год} = 4,568 \cdot 10^{-2} \cdot 365 = 16,6805 \text{ кг.}$$

Рассчитаем потерю массы токосъемного элемента, кг, вследствие равномерного по всей площади контакта износа:

# Подвижной состав железных дорог

$$M_{\text{изн\_T}} = Y_T \cdot l_{\text{пути\_тр\_T}} \cdot S_{\text{конт\_T}} \cdot \rho_T, \quad (2)$$

где  $Y_T$  – средний удельный износ токосъемного элемента (см. таблицу 1);

$l_{\text{пути\_тр\_T}}$  – длина пути трения одного токосъемного элемента вдоль шинопровода,

$$l_{\text{пути\_тр\_T}} = 4700 \text{ м};$$

$S_{\text{конт\_T}}$  – площадь трения одного токосъемного элемента  $1,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  при средней длине одного токоприемника 0,130 м и поверхности трения контакта токосъемного элемента 0,008 м (см. рисунок 2, в);

$\rho_T$  – плотность материала токосъемного элемента из меди,  $\rho_T = 8,93 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Для нажатия в 35 Н масса продуктов износа всех токосъемных элементов вдоль двух плеч трассы ММТС за 88 рейсов в сутки

$$M_{\text{изн\_T\_сут}} = 0,283 \cdot 10^{-9} \cdot 9400 \cdot 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot 8,93 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 88 \cdot 2 = 6,52 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$$

Суммарная масса выбросов продуктов износа токосъемных элементов вдоль трассы ММТС в течение года

$$M_{\text{изн\_T\_год}} = 0,0652 \cdot 365 = 23,8009 \text{ кг.}$$

Аналогичный расчет потери массы шинопроводов и токосъемных элементов вследствие износа проведем для усилия нажатия в 48 Н. Результаты расчетов сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Прогнозируемая масса выбросов продуктов износа контактных элементов в окружающую среду вдоль трассы ММТС

Усилие нажатия, Н	Масса продуктов износа шинопровода (бронза), кг		Масса продуктов износа всех токосъемных элементов (медь), кг		Суммарная масса вы- бросов, кг	
	за сутки	в год	за сутки	в год	за сутки	в год
35	0,0457	16,674	0,0652	23,8009	0,1109	40,479
48	0,0704	25,678	0,0100	36,509	0,0804	62,187

Качественный состав выбросов в окружающую среду определяется в соответствии с химическим составом материалов, из которых изготовлены устройства токосъема. Система токосъема ММТС включает в себя шинопровод из бронзы марки «БрНХ» (в составе сплава имеются медь, никель, хром, кремний) и токосъемный элемент из меди, входящий в конструкцию токоприемника подвижного состава. Таким образом, в выбросах содержатся медь, никель, хром, кремний.

Анализ распределения массы выбросов по химическим элементам проведем с учетом содержания весовых долей никеля, хрома, кремния и меди в сплаве «БрНХ», из которого изготовлен шинопровод (Ni: 2 – 2,6 %; Cr: 0,5 – 1; Si: 0,5 – 0,9 и Cu: 94,6 – 97 % соответственно) (таблица 3).

Таблица 3 – Качественный состав выбросов продуктов износа устройств токосъема в окружающую среду

Усилие нажатия, Н	Масса продуктов износа устройств токосъема за год, кг			
	медь	никель	хром	кремний
35	39,579 – 39,979	0,333 – 0,434	0,083 – 0,167	0,083 – 0,150
48	60,800 – 61,417	0,514 – 0,668	0,128 – 0,257	0,128 – 0,231

Для расчета загрязнения атмосферы продуктами износа воспользуемся известной методикой расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, изложенной в действующем нормативном документе [6]. ОНД-86 пред-

# Подвижной состав железных дорог

назначен для расчета приземных концентраций в двухметровом слое над поверхностью земли, а также вертикального распределения концентраций.

Степень опасности загрязнения атмосферного воздуха характеризуется наибольшим расчетанным значением концентрации, соответствующим неблагоприятным метеорологическим условиям.

Принимаем следующие допущения:

вычисления основываются на замене линейного источника (трассы ММТС) совокупностью одинаковых равноудаленных условных точечных источников, как это рекомендуется в п. 3 работы [6];

в качестве эквивалентного диаметра устья источника выброса принимаем диаметр круга, равновеликого по площади поверхности контакта токосъемного элемента с шинопроводом;

рассматриваем неблагоприятные метеорологические условия при полном отсутствии ветра, что способствует оседанию и накоплению концентраций вредных веществ в ограниченном объеме воздуха вдоль трассы;

мелкодисперсная фракция, образующая взвешенную концентрацию загрязняющих веществ в приземной слое воздуха вдоль трассы, составляет 80 % общей массы выбросов, что установлено в экспериментальных исследованиях.

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества  $C_M$  (мг/м<sup>3</sup>) при выбросе пылегазовоздушной смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при неблагоприятных метеорологических условиях и определяется по формуле:

$$C_M = \frac{AM F m n \eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы; значение коэффициента  $A$ , соответствующее неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна, принимается равным 140 для Московской области [6];

$M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе; принимается равным 3 для мелкодисперсных аэрозолей и при отсутствии очистки (согласно п. 2.5, б) работы [6]);

$m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода пылевоздушной смеси из устья источника выброса; значения коэффициентов  $m = 1,394$  и  $n = 0,581$  определяются по рисункам 2.1, 2.2 методики [6] в зависимости от ряда параметров источника выбросов;

$H$  – высота источника выброса над уровнем земли,  $H = 2$  м;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$  [6];

$\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой пылегазовоздушной смеси  $T_g$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_b$  °C; при определении значения  $\Delta T$  (°C) следует принимать температуру окружающего атмосферного воздуха  $T_b$  (°C) равной средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца года по СНиП 2.01.01-82, а температуру выбрасываемой в атмосферу пылевоздушной смеси  $T_g$  (°C) – по действующим для данного объекта технологическим нормативам,  $\Delta T = 28 - 23 = 5$  °C;

$V_1$  – расход пылегазовоздушной смеси, м<sup>3</sup>/с, определяемый по формуле:

# Подвижной состав железных дорог

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} w_0, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр устья источника выброса,  $D = 3,19 \cdot 10^{-3}$  м ;

$w_0$  – средняя скорость выхода пылегазовоздушной смеси из устья источника выброса, м/с. При средней скорости движения ЭПС 40 км/ч  $w_0 = 40 \cdot 1000 / 3600 = 11,111$  м/с.

Тогда  $V_1 = 3,142 \cdot 0,00319^2 \cdot 11,111 / 4 = 2,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с.

Согласно указаниям [6] в расчете принимаются сочетания величин  $M$  и  $V_1$ , реально имеющие место в течение года при установленных условиях эксплуатации ММТС (16 ч в сутки), при которых достигается максимальное значение  $C_M$ :

$$M = \frac{M_\Gamma \cdot 1000 \cdot 0,8}{365 \cdot 16 \cdot 3600}, \quad (5)$$

где  $M_\Gamma$  – масса продуктов износа устройств токосъема за год, кг (см. таблицу 3).

Для меди при нажатии в 48 Н выброс мелкодисперсной фракции в атмосферу

$$M = \frac{61,417 \cdot 1000 \cdot 0,8}{365 \cdot 16 \cdot 3600} = 2,337 \cdot 10^{-3} \text{ г/с.}$$

Приземная концентрация частиц меди в воздухе

$$C_M = \frac{140 \cdot 2,337 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 1,394 \cdot 0,581}{2^2 \sqrt[3]{2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 5}} = 7,245 \cdot 10^{-3} \text{ мг/м}^3.$$

Расчет приземных концентраций для меди, никеля, хрома и кремния при контактных нажатиях в 35 и 48 Н выполняется аналогично. Результаты расчета сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Расчетные концентрации содержания продуктов износа в воздухе

Условия, принятые в расчете	Расчетные концентрации продуктов износа в воздухе, мг/м <sup>3</sup>			
	медь	никель	хром	кремний
Усилие нажатия в 35 Н	$4,716 \cdot 10^{-3}$	$5,119 \cdot 10^{-5}$	$1,969 \cdot 10^{-5}$	$1,769 \cdot 10^{-5}$
Усилие нажатия в 48 Н	$7,245 \cdot 10^{-3}$	$7,879 \cdot 10^{-5}$	$3,031 \cdot 10^{-5}$	$2,724 \cdot 10^{-5}$

Предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе, почве и воде загрязняющих веществ и их классы опасности в соответствии с рекомендациями [2 – 5] при поступлении в окружающую среду в процессе износа шинопровода и токосъемных элементов ММТС приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Нормы содержания загрязняющих веществ в окружающей среде

Наименование вещества	Формула вещества	Класс опасности	Среднесуточная ПДК в воздухе, мг/м <sup>3</sup>	Величина ПДК в воде, мг/л	Величина ПДК в почве с учетом фона, мг/кг
Кремний (двуокись кремния)	Si (SiO <sub>2</sub> )	3	0,002	10,0	Не нормируется
Медь	Cu	2	0,001	1,0	3,0
Никель	Ni	2	0,0015	0,1	4,0
Хром	Cr <sup>3+</sup>	1	0,15	0,5	6,0
Хром	Cr <sup>6+</sup>	1	0,15	0,05	6,0

# Подвижной состав железных дорог

Сравнительный анализ данных, приведенных в таблицах 4 и 5, показывает, что превышение расчетных концентраций в атмосферном воздухе над ПДК фиксируется для меди: при усилии нажатия в 35 Н – в 2,35 раза и в 48 Н – в 3,6 раза. Для никеля, хрома и кремния расчетные концентрации не превышают соответствующие ПДК при рассмотренных усилиях нажатия. Медь относится к веществам второго класса опасности, т. е. высокоопасным. Кроме того, все указанные в таблицах 4, 5 загрязняющие вещества обладают односторонним резорбтивным действием на организм человека, что усиливает негативный эффект их одновременного присутствия во вдыхаемом воздухе.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки риска химического загрязнения среды обитания, выявления приоритетных региональных проблем, связанных с качеством окружающей среды, обоснования и принятия решений по их минимизации. Авторами предложена полезная модель токоприемника транспортного средства с улучшенными экологическими характеристиками, позволяющая снизить вынос продуктов износа контактных элементов в окружающую среду [7].

## Список литературы

1. Сидоров О. А. Системы контактного токосъема с жестким токопроводом: Монография [Текст] / О. А. Сидоров. – М.: Маршрут, 2005. – 106 с.
2. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.695-98. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [Текст] / Минздрав России. – М., 1998. – 16 с.
3. Гигиенические нормативы ГН 6229-91. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые количества (ОДК) химических веществ в почве [Текст]. – М., 1991. – 12 с.
4. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.689-98 Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [Текст]. – М.: Нефтяник, 1991. – 22 с
5. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 18 с.
6. ОНД-86 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий [Текст]. – М., 1986. – 42 с.
7. Пат. 81920 Российская Федерация, МПК В 60 L 5/00. Токоприемник транспортного средства/ Сидоров О. А., Чертков И. Е., Дударева К. С., Мусаткина Б. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения; – опубл. 10.04.2009, Бюл. № 10.

---

УДК 621. 436.001.5

Е. И. Сквородников, М. В. Лифанов, А. С. Анисимов

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ ПД1М И 1-ПД4Д В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*В статье рассмотрено влияние конструктивных решений, реализованных при создании дизеля 1-ПД4Д, на показатели его надежности. Представлены сравнительный анализ параметров топливоподачи дизелей ПД1М и 1-ПД4Д и анализ причин выхода из строя подшипников коленчатого вала.*

Модернизация конструкции дизелей тягового подвижного состава является наиболее эффективным способом поддержания и увеличения их ресурса, а также сохранения конку-

# Подвижной состав железных дорог

рентных качеств на рынке аналогичной продукции. В общем случае оценка конкурентных качеств основывается главным образом на анализе соответствия некоторой совокупности рабочих параметров объекта требованиям технического задания заказчика и действующей технической документации при условии минимизации затрат на эксплуатацию.

В наиболее широком смысле слова это соответствие является синонимом таким важным свойствам объекта, как эффективность и надежность. Показатели надежности, такие как безотказность, долговечность, ремонтопригодность, в свою очередь предопределяют саму оценку эффективности как результат длительного многостороннего исследования рассматриваемого объекта при его непосредственном использовании по назначению и сравнении с образцами-аналогами.

В настоящей статье рассмотрена взаимосвязь между подходом, выбранным ОАО «Пензадизельмаш» к решению вопроса по модернизации и запуску в производство дизелей серии 1-ПД4Д, и проблемами, с которыми непосредственно столкнулись линейные предприятия сети железных дорог России при эксплуатации этих дизелей на тепловозах ТЭМ18Д.

Модернизация дизелей серии ПД1М до серии 1-ПД4Д является последовательным шагом, предпринятым ОАО «Пензадизельмаш» в целях улучшения характеристик и эксплуатационных качеств этого надежного в работе дизеля, устанавливаемого на тепловозах ТЭМ2 различных модификаций.

Помимо этого модернизация дизеля ПД1М имела своей целью создание двигателя для новой серии маневровых тепловозов ТЭМ18Д, планируемых к выпуску на ОАО «Брянский машиностроительный завод». Тепловозы ТЭМ18, ТЭМ18Д тоже в свою очередь являются модернизированной версией, пожалуй, самого распространенного на сети дорог России маневрового тепловоза ТЭМ2, выпускающегося без кардинальных конструктивных изменений с начала 70-х гг. прошлого столетия. Модернизация этого тепловоза предусматривала в первую очередь установку более мощного дизель-генератора мощностью 993 кВт, практически совпадающую с мощностью дизель-генераторной установки тепловозов ЧМЭ3, изменение в конструкции экипажной части с заменой челюстных тележек на бесчелюстные по типу тележек тепловозов ТЭ116, отказ от воздушно-масляных секций для охлаждения моторного масла и организации дополнительного водяного контура для его охлаждения в водомасляном теплообменнике, модернизацию системы возбуждения главного генератора с внедрением системы УСТА, дистанционный контроль за параметрами работы дизель-генераторной установки и вспомогательными системами тепловоза с помощью бортового компьютера.

Установка на тепловоз модернизированного дизель-генератора должна была обеспечить снижение удельного эффективного расхода топлива с 225 г/кВт·ч до 197 [1, 2] в пересчете на показатель эффективной мощности дизеля, что в конечном итоге в среднем должно было дать до 17 т экономии дизельного топлива в год на один тепловоз при выполнении одинакового объема маневровой работы в сравнении с тепловозом ТЭМ2.

Согласно плану по замене локомотивного парка сети железных дорог при реализации «Стратегии развития железнодорожного транспорта до 2010 г.», принятой ОАО «РЖД», первые тепловозы серии ТЭМ18Д (рисунок 1) начали поступать в локомотивные депо сети дорог в 2006 г.

При эксплуатации новых машин отмечались неисправности по следующим группам оборудования [3]: по электрооборудованию – 28 %, из которых более 50 % относились к отказам электронного оборудования; по дизелю – 25 % от общего количества неисправностей; по вспомогательному оборудованию – 9 %; по экипажной части – 9 %; по тормозному оборудованию – 6 % и прочие неисправности – 23 %.

Из перечисленных групп наиболее серьезными оказались неисправности, связанные с выходом из строя оборудования дизеля, где самым распространенным стал выход из строя коренных и шатунных подшипников коленчатого вала – до 40 % от общего количества неисправностей, отнесенных к оборудованию дизельной группы. Данная неисправность (рисунок 2)

## Подвижной состав железных дорог

связана с повышенным износом рабочих поверхностей коренных и шатунных подшипников с последующим разрушением слоя баббита и бронзовой основы подшипника.

Износ подшипников сопровождается резким увеличением в моторном масле концентрации свинца (Pb) до 200 – 400 г/т, многократно превышающем допустимое значение, и понижением давления масла в системе смазки до уровня срабатывания системы защиты дизеля по низкому давлению масла ( $P_m = 0,13 - 0,14$  МПа).



Рисунок 1 – Маневровый тепловоз ТЭМ18Д

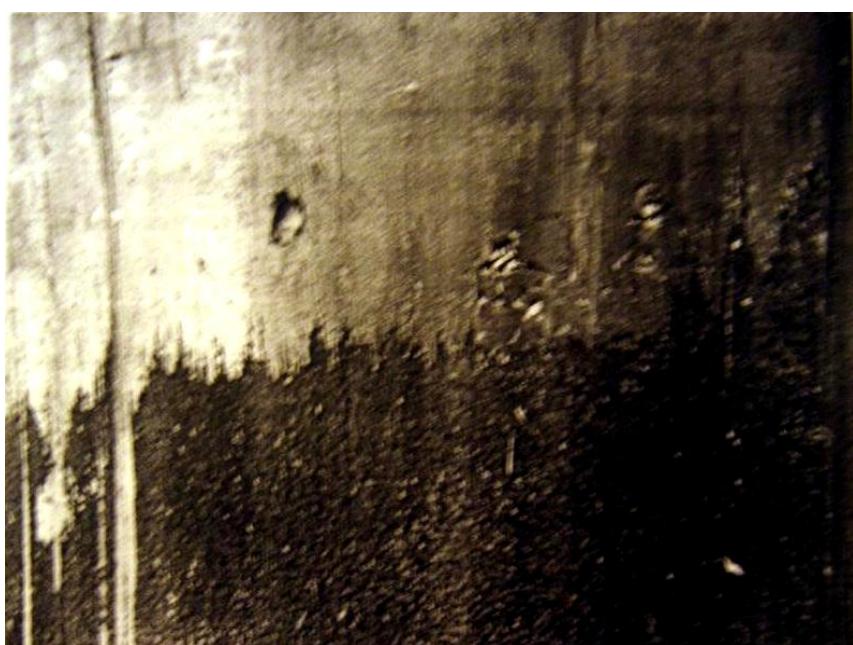


Рисунок 2 – Внешний вид износа рабочей поверхности коренного вкладыша дизеля 1-ПД4Д

На начальном этапе поставок тепловозов на линейные предприятия к особенностям данной неисправности относится то, что отказ наступал в среднем после шести – восьми месяцев эксплуатации дизеля и проявлялся практически на всех локомотивах, поступающих с за-

# Подвижной состав железных дорог

вода. К началу 2008 г. в тех локомотивных депо, куда осуществлялись поставки новых тепловозов, выход из строя подшипниковых узлов коленчатого вала дизеля приобрел массовый характер, ставя под угрозу срыва маневровую работу на многих станциях сети дорог, в том числе таких крупных, как Свердловск-Сортировочный, Новосибирск, Тайшет, Иркутск-Сортировочный, Улан-Удэ.

В итоге практически новый локомотив в среднем на две – три недели, на период устранения неисправности, переводился в разряд неисправных, принося вместо ожидаемой прибыли многомиллионные убытки.

С учетом серьезности последствий возникшей проблемы ее решение было взято под личный контроль главным инженером ОАО «РЖД» В. А. Гапановичем, который своим распоряжением утвердил перечень базовых депо на Свердловской, Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской железных дорогах, где были организованы центры оперативного ремонта дизелей неисправных тепловозов; этими центрами стали локомотивные депо Свердловск Новокузнецк, Белово и Зима. Помимо чисто технического решения проблемы к поиску ее причин были подключены ведущие отраслевые научно-исследовательские институты ВНИИЖТ и ВНИКТИ, а также инженерно-технический персонал организованных центров оперативного ремонта.

Проведенный в данной статье анализ возможных причин неисправности подшипниковых узлов коленчатого вала базируется на наиболее вероятных из них, которыми можно считать следующие:

нарушение температурного режима дизеля вследствие установки водомасляного теплообменника в «горячий» контур охлаждения;

повышение максимального давления цикла до 9,17 МПа ( $90 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ) с одновременной настройкой дизеля на номинальную мощность 993 кВт. Следует отметить, что одним из первых рекомендованных заводом-изготовителем мероприятий по стабилизации положения с выходом из строя подшипников коленчатого вала было как раз снижение номинальной мощности дизеля до уровня 882 кВт, т. е. такой же, как и на дизелях ПД1М. Уменьшение мощности повлекло за собой снижение максимального давления сгорания  $P_z$  до значений 8,05 – 8,36 МПа ( $79 - 82 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ), однако полностью устранить отказы подшипников коленчатого вала изменением настройки мощности не удалось.

Снижение эффективности водомасляного теплообменника связано с циркуляцией в нем горячей воды с температурой около  $80^\circ\text{C}$  из контура охлаждения дизеля. На режимах, близких к номинальному, это приводит к тому, что температура масла на входе в дизель после охлаждения составляет  $77 - 80^\circ\text{C}$ , что значительно превышает рекомендуемый заводом-изготовителем диапазон в  $65 - 72^\circ\text{C}$ . Фактический температурный режим, при котором масло находится в зоне трения шеек коленчатого вала и подшипников на дизеле ПД1М, предполагает нагрев масла до температуры ориентировочно  $100 - 110^\circ\text{C}$ . По результатам исследований вышедших из строя вкладышей подшипников дизелей 1-ПД4Д, проведенных ВНИИЖТом, установлено наличие на вкладышах локальных областей нагрева до температуры  $150 - 160^\circ\text{C}$ , позволяющих сделать предположение о том, что масло в рабочей зоне подшипникового узла успевает нагреваться до температуры  $120 - 125^\circ\text{C}$ .

Для моторного масла марки М-14Г<sub>2</sub>, применяемого на дизелях ПД1М и 1-ПД4Д, кинематическая вязкость может быть определена по эмпирической зависимости вида [4]:

$$\nu_T = 2,29042 \cdot 10^6 \cdot (T - 273,15)^{-2,60745},$$

где  $\nu_T$  – кинематическая вязкость масла при температуре  $T$ , (сСт);

$T$  – текущая температура масла, К.

С применением приведенного выражения для расчета средней температуры масла в рабочей зоне подшипникового узла дизеля ПД1М, равной  $105^\circ\text{C}$ , и средней температуры масла в рабочей зоне подшипникового узла дизеля ПД4Д, равной  $120^\circ\text{C}$ , получены следующие значения кинематической вязкости масла: 12,2 сСт для дизелей ПД1М и 8,68 сСт – для дизелей

# Подвижной состав железных дорог

ПД4Д соответственно. Пониженная вязкость масла при одинаковом уровне его давления в системе смазки, а также увеличение максимального давления сгорания на номинальном режиме на 1МПа (7,09 МПа у ПД1М и 8,1 МПа у 1-ПД4Д), дающее около 8 тс дополнительной нагрузки на узел «поршень – шатун – шейка коленчатого вала», позволяют предположить о разрушении масляного клина в зоне контакта шейки коленчатого вала и рабочего вкладыша подшипника и о нарушении режима жидкостного трения.

Дальнейший анализ указанных выше причин выхода из строя подшипников коленчатого вала был основан на изучении способа, при помощи которого на дизелях 1-ПД4Д в первоначальном варианте настройки мощности было достигнуто ее увеличение до 993 кВт, а также влияния, которое этот способ оказал на теплотехническое состояние дизеля.

Изменение мощности дизеля в сторону увеличения было произведено путем модернизации топливной аппаратуры, связанной с установкой на валу топливного насоса высокого давления кулачковых шайб нового профиля – «D» – и с увеличением цикловой подачи топлива. Изменение профиля кулачковой шайбы (рисунок 3) повлияло главным образом на характеристику впрыска топлива, увеличив скорость впрыска, а также фактический угол опережения впрыска на каждой рабочей позиции дизель-генератора.

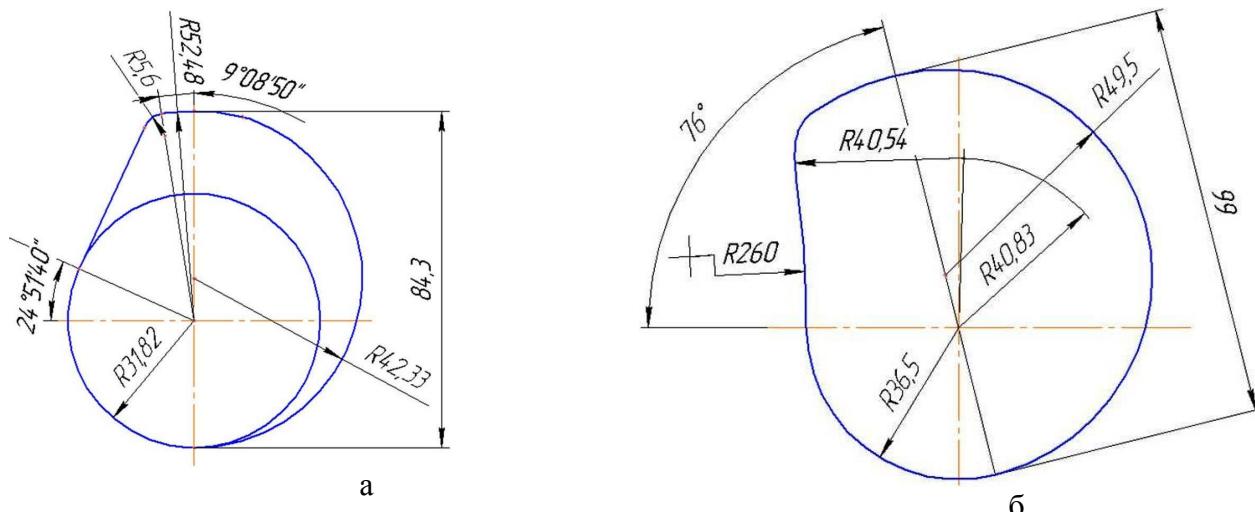


Рисунок 3 – Профиль кулачковой шайбы ТНВД дизелей ПД1М (а) и 1-ПД4Д (б)

Полученная расчетным способом зависимость величины подъема плунжера от угла поворота кулачкового вала ТНВД в зоне набегающей части шайбы (рисунок 4) позволяет наглядно проиллюстрировать сдвиг фазы перемещений плунжера при одинаковом угле поворота кулачкового вала в среднем на 1 – 3,5° по сравнению с аналогичной позицией дизеля ПД1М.

Из-за четырехтактного рабочего цикла рассматриваемых дизелей сдвиг фаз перемещения плунжера приводит к увеличению на дизеле 1-ПД4Д геометрического угла впрыска топлива от 2 до 7° по повороту коленчатого вала.

Влияние, которое оказала модернизация топливной аппаратуры дизеля на изменение теплотехнических параметров работы дизелей, было оценено с использованием программных комплексов «Впрыск» и «Diesel-RK», разработанных в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Программный комплекс «Впрыск» позволяет произвести расчет системы топливоподачи в цилиндры дизеля, учитывая особенности конструкции узлов топливной системы, в том числе профиля кулачковой шайбы топливного насоса, режимов ее работы, и получить характеристику впрыска топлива (рисунок 5) как зависимость объемной скорости впрыска топлива через форсунку дизеля от угла поворота кулачкового вала топливного насоса.

# Подвижной состав железных дорог

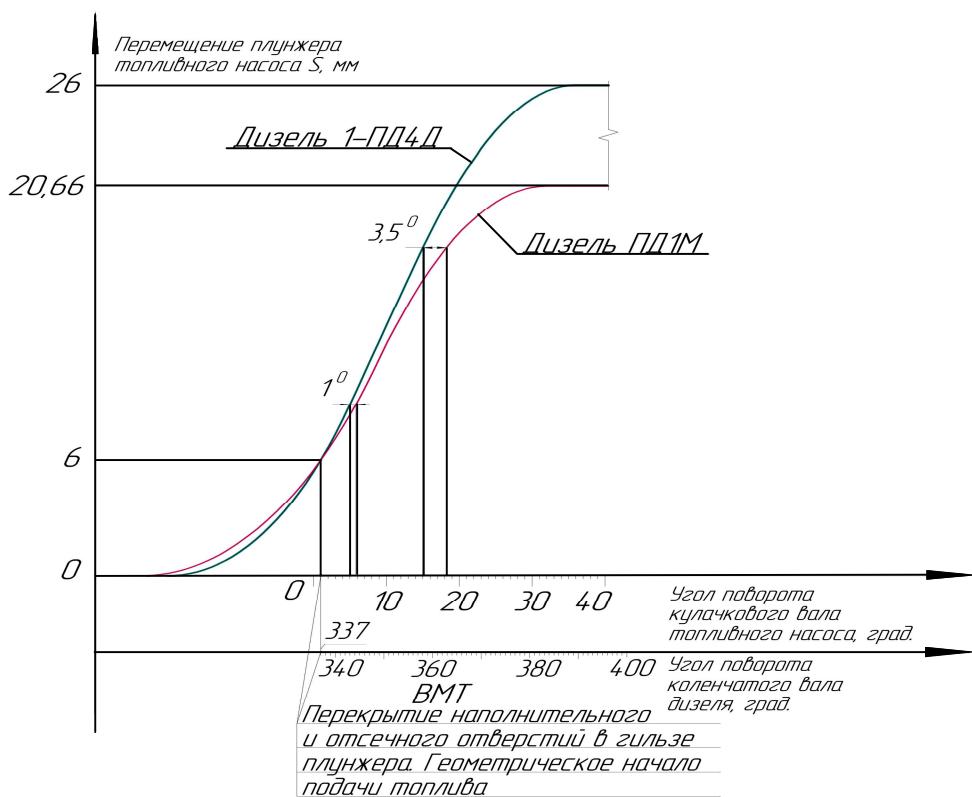


Рисунок 4 – Перемещение плунжера ТНВД дизелей ПД1М и 1-ПД4Д в зависимости от угла поворота кулачкового вала

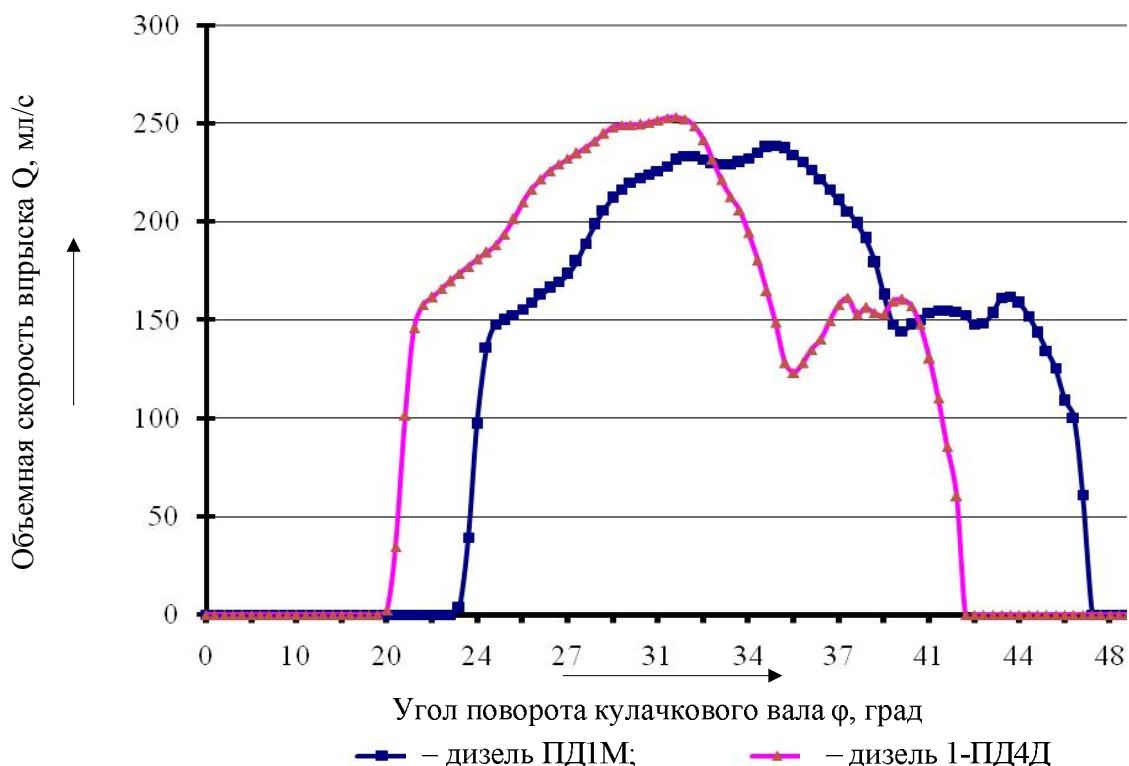


Рисунок 5 – Расчетные характеристики впрыска топлива на номинальном режиме для дизелей ПД1М и 1-ПД4Д

# Подвижной состав железных дорог

Расчетная характеристика впрыска топлива является базой для теплового расчета непосредственно самого двигателя в программном комплексе «Diesel-RK», математический аппарат которого основан на применении основных положений метода профессора Н. Ф. Разлейцева [5], предложенного им для расчета смесеобразования и сгорания топлива в цилиндре дизеля.

Программный комплекс «Впрыск» позволяет рассчитать такие важные показатели работы топливной системы, как цикловая подача топлива, геометрическая и фактическая продолжительность впрыска, максимальное и среднее давление впрыска топлива в цилиндр дизеля, доля топлива в основной части впрыска и при подвпрыске. Учет особенностей конструкции узлов топливной аппаратуры при настройке программного комплекса позволяет учитывать и такую важную составляющую процесса подачи топлива, как влияние на впрыск распространения волн давления по линии нагнетательного трубопровода. Учет волновых процессов особенно важен для дизелей ПД1М и 1-ПД4, поскольку конструктивно эти двигатели имеют длинные трубопроводы высокого давления с варьированием длины трубок от 955 до 1350 мм.

Модель сгорания профессора Н. Ф. Разлейцева, заложенная в программном комплексе «Diesel-RK», учитывает характеристику впрыска и мелкость распыливания (так называемый заутеровский диаметр капель топлива), позволяя на каждом шаге расчета учитывать динамику приращения параметров рабочего процесса. Функция одно- и двумерного сканирования, заложенная в программном комплексе «Diesel-RK», позволяет на основе настроек текущего режима счета вести расчет изменений основных параметров рабочего процесса относительно задаваемого интервала одного или двух интересующих пользователя параметров. На основе расчетов, проведенных с применением указанных программных комплексов, получены значения основных текущих параметров работы дизелей ПД1М и 1-ПД4Д, которые позволяют сделать некоторые выводы о степени влияния изменений в конструкции топливной аппаратуры дизеля 1-ПД4Д на теплотехнические параметры работы двигателя. Перечень полученных расчетных значений параметров работы рассматриваемых дизелей приведен в таблицах 1 – 3.

Расчет рабочих режимов дизелей велся при условии максимально возможного совпадения полученных данных со значениями паспортных характеристик дизелей.

Анализ полученных данных показал, что при соблюдении условия совпадения значений мощности обоих дизелей протекание рабочих процессов в цилиндрах дизелей 1-ПД4Д происходит при больших давлениях  $P_z$  (рисунок 6), что связано, прежде всего, с более ранним началом подачи топлива в цилиндр и соответственно с более ранним началом его сгорания.

Таблица 1 – Расчетные показатели работы дизелей ПД1М и 1-ПД4Д

Позиция контроллера машиниста (КМ)	Частота вращения коленчатого вала, мин <sup>-1</sup>	Нагрузка дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза (паспортные значения), кВт	Эффективная мощность дизель-генератора (расчетная) $N_e$ , кВт		Среднее эффективное давление (расчетное) $P_e$ , МПа	
			ПД1М	1-ПД4Д	ПД1М	1-ПД4Д
1	2	3	4	5	6	7
0	300	xx	123,5	140,6	0,31	0,36
1	300	25-35	150,0	156,7	0,38	0,4
2	300	75-95	179,5	190,4	0,46	0,49
3	330	125-155	240,3	238,8	0,56	0,55
4	400	205-235	332,9	318,5	0,64	0,61

# Подвижной состав железных дорог

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
5	480	305-355	434,4	440,8	0,69	0,7
6	570	445-495	594,7	593,3	0,8	0,8
7	650	585-635	726,3	723,8	0,86	0,86
8	750	720-740	888,5	887,7	0,91	0,91

Таблица 2 – Расчетные показатели работы дизелей ПД1М и 1-ПД4Д

Позиция КМ	Частота вра- щения колен- чатого вала, $\text{мин}^{-1}$	Максимальное давление сгорания Рz, МПа		Цикловая подача топлива, gс, г		Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)
		ПД1М	1-ПД4Д	ПД1М	1-ПД4Д	
0	300	3,42	3,83	0,545	0,5933	238,21
1	300	3,64	3,88	0,648	0,685	233,4
2	300	3,74	4,02	0,765	0,7952	230,1
3	330	3,99	4,24	0,942	0,8973	232,88
4	400	4,30	4,55	1,107	0,9915	239,41
5	480	4,56	5,28	1,213	1,109	241,22
6	570	5,28	6,54	1,361	1,24	234,84
7	650	6,21	7,41	1,455	1,322	234,31
8	750	7,06	8,01	1,527	1,421	231,99
						216,1

Таблица 3 – Расчетные показатели работы дизелей ПД1М и 1-ПД4Д

Позиция КМ	Частота вра- щения колен- чатого вала, об/мин	Геометрический угол опережения впрыска топлива, град до/после ВМТ, градусов ПКВ		Фактический угол опережения впрыска топлива град до/после ВМТ, градусов ПКВ	
		ПД1М	1-ПД4Д	ПД1М	1-ПД4Д
0	300	23	23	-3	-2
1	300	23	23	-2	-1
2	300	23	23	-2	-1
3	330	23	23	-1	1
4	400	23	23	1	3
5	480	23	23	4	7
6	570	23	23	8	11
7	650	23	23	13	16
8	750	23	23	17	20

# Подвижной состав железных дорог

Момент подачи топлива в цилиндр дизеля характеризуется фактическим углом опережения впрыска топлива (рисунок 7), разница в котором варьируется от 1 до 3° поворота коленчатого вала в сторону более раннего впрыска для дизеля 1-ПД4Д.

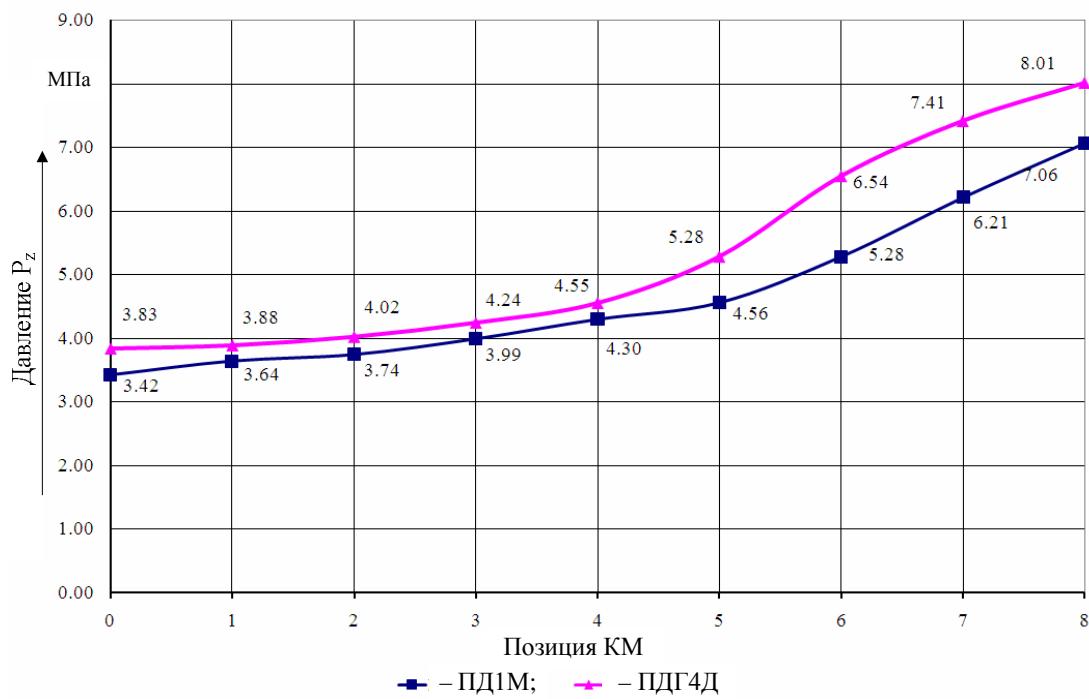


Рисунок 6 – Расчетные значения максимального давления цикла дизелей ПД1М и 1-ПД4Д

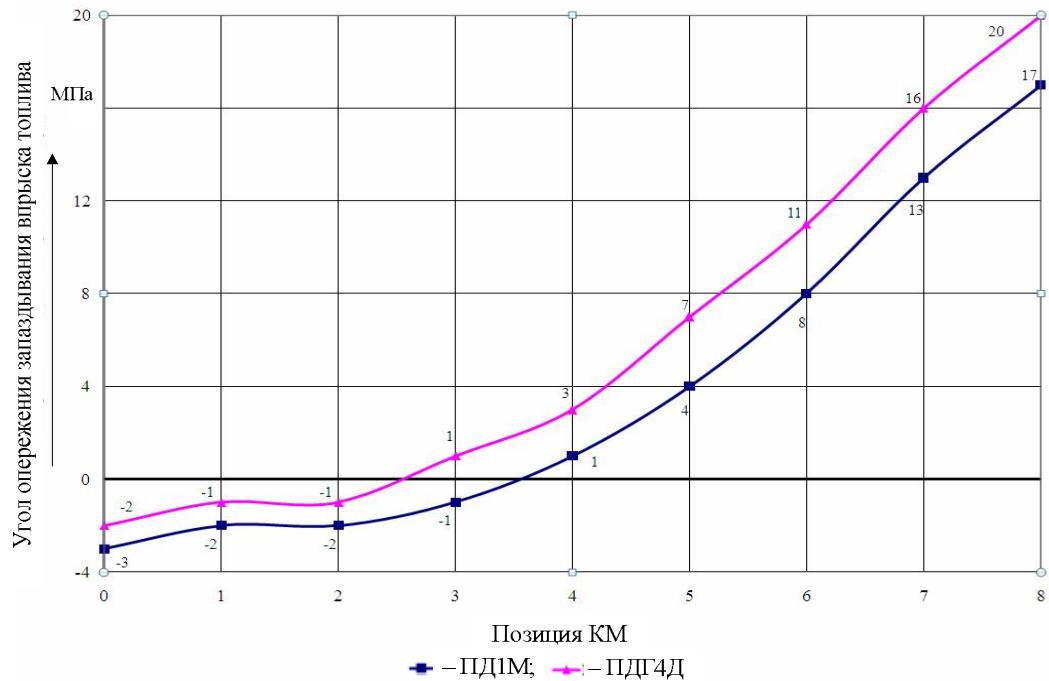


Рисунок 7 – Расчетные значения фактического угла опережения впрыска топлива для дизелей ПД1М и 1-ПД4Д

Увеличение фактического угла опережения впрыска топлива способствует более раннему и интенсивному началу сгорания порции топлива в цилиндре дизеля. На средних и номинальном режимах работы дизеля период задержки воспламенения топлива для обоих дизелей

## Подвижной состав железных дорог

примерно одинаков и составляет от 3 до 6° поворота коленчатого вала, что делает протекание процесса сгорания топлива для дизеля 1-ПД4Д, особенно в период нахождения поршня у верхней мертвой точки (ВТМ), более интенсивнее и жестче. Расчетные данные позволяют увидеть, что начиная с 5-й позиции контроллера машиниста разница между максимальным давлением цикла двух дизелей резко возрастает примерно до 0,72 МПа, что дополнительно добавляет 6,3 тс нагрузки на шатунно-поршневой узел.

Принимая во внимание эту дополнительную нагрузку на шатунно-поршневой узел, а также то, что уровень давления масла в системе смазки на данной позиции для обоих дизелей находится в пределах 0,35 – 0,41 МПа и то, что 5-я позиция контроллера машиниста относится к наиболее часто используемым в эксплуатации, можно сделать предположение о том, что одной из составляющих в причинах выхода из строя подшипников коленчатого вала дизеля 1-ПД4Д является как раз выявленный скачок максимального давления на промежуточной позиции его работы.

Проиллюстрировать изменение интенсивности тепловыделения при сгорании топлива в цилиндрах дизелей на номинальном режиме позволяют графики на рисунке 8, полученные при расчетах на ПК «Diesel-RK». Как видно из приведенных графиков, интенсивность тепловыделения у дизеля 1-ПД4Д при сгорании основной порции топлива примерно на 25 % выше, чем у дизеля ПД1М, что обуславливает сокращение периода тепловыделения (наличие скорости тепловыделения) у дизеля 1-ПД4Д примерно на 18° поворота коленчатого вала.

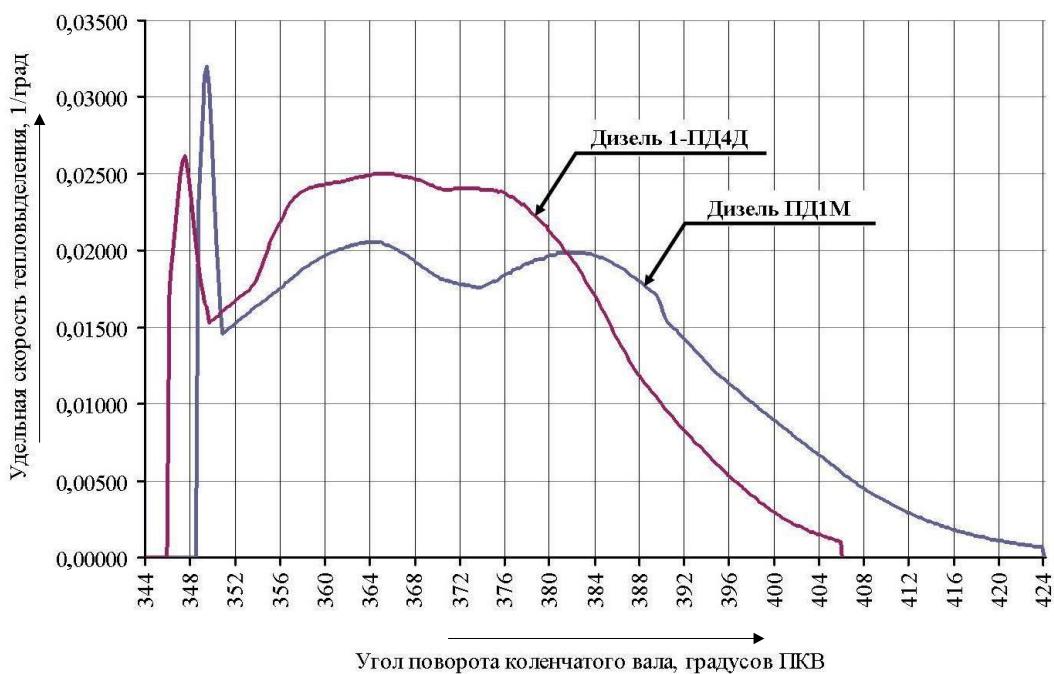


Рисунок 8 – Зависимость скорости тепловыделения при сгорании топлива у дизеля ПД1М от угла поворота коленчатого вала

Жесткость в работе дизелей ПД4Д оценивается даже на слух, звук работающего дизеля по сравнению с дизелем ПД1М более резок, в нем явно улавливаются звуковые составляющие от ударного увеличения давления на узлы цилиндрапоршневой группы.

Анализируя данные по расчетным значениям фактического угла опережения впрыска топлива, можно сделать вывод о влиянии линейной скорости перемещения плунжера на фактическое начало подачи топлива в цилиндр дизеля, а также о влиянии на начало этого момента конструктивных особенностей устройства узлов топливной аппаратуры, в частности, длины трубок высокого давления и устройства нагнетательного клапана. Полученные дан-

# Подвижной состав железных дорог

ные позволяют выявить зависимость между величиной хода разгрузки нагнетательного клапана, длиной трубок высокого давления и динамикой изменения цикловой подачи топлива между режимами работы дизелей [6]. На низких позициях цикловая подача топлива относительно невелика и с учетом небольшой линейной скорости нагнетательного хода плунжера (на 0-й, 1-й и 2-й позициях – 0,71 м/с для дизелей ПД1М и 0,758 м/с – для 1-ПД4Д) и величины хода разгрузки нагнетательного клапана, равного 2 мм, ее фактическая подача в цилиндр дизеля отличается запаздыванием, что приводит к попаданию топлива в цилиндр дизеля уже после прохождения поршнем внутренней мертвой точки. На практике для низких позиций работы дизеля нередким является так называемый пропуск впрыска, когда отсечка топлива происходит до того, как нагнетательный клапан выберет величину хода разгрузки и фактическая величина давления в нагнетательном трубопроводе окажется меньше давления начала подъема иглы форсунки. Нагнетание достаточного для начала впрыска топлива давления происходит в этом случае на втором цикле подачи топлива, приводя все к тому же запаздыванию в моменте начала впрыска. Увеличение от позиции к позиции цикловой подачи топлива (рисунок 9) и линейной скорости перемещения плунжера способствует уменьшению разницы между геометрическим и фактическим углами опережения впрыска топлива.

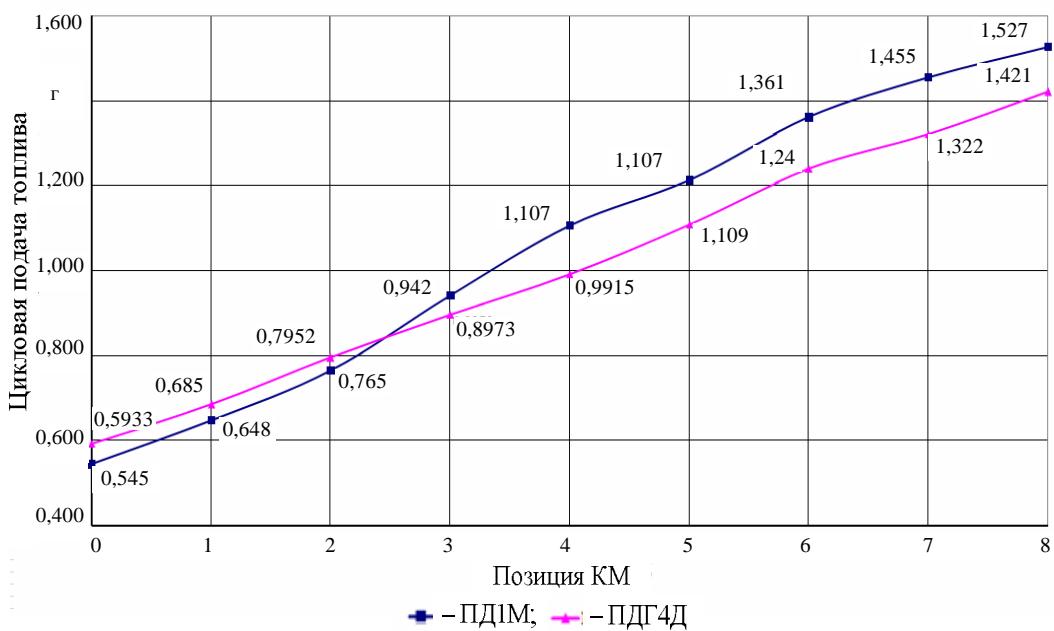


Рисунок 9 – Расчетные значения цикловой подачи топлива

Изменения характеристики впрыска благоприятно сказались на значениях цикловой подачи топлива и, как следствие, удельного эффективного расхода топлива дизелем 1-ПД4Д, особенно на наиболее часто используемых в эксплуатации позициях. Обеспечение более полного сгорания топлива за счет более быстрого его впрыска в цилиндр дизеля способствовало уменьшению цикловой порции топлива на величину от 0,04 до 0,1 г за цикл. Снижение цикловой подачи топлива повлияло и на значения удельного эффективного расхода топлива дизеля 1-ПД4Д, обеспечивая в диапазоне рабочих позиций его снижение на 4 – 10 %.

Краткий анализ рассмотренных причин выхода из строя коренных и шатунных подшипников коленчатого вала дизелей 1-ПД4Д позволил сделать ряд предположений о составляю-

# Подвижной состав железных дорог

щих этих причин, непосредственно влияющих на возникновение неисправности. К этим составляющим были отнесены

неэффективное охлаждение моторного масла, приводящее к снижению его кинематической вязкости и, как следствие, к снижению прочности и несущей способности масляного клина в подшипниках скольжения коленчатого дизеля;

повышение максимального давления рабочего цикла посредством модернизации кулачковой шайбы вала ТНВД без соответствующего изменения параметров геометрического угла опережения впрыска топлива;

резкий скачок максимального давления цикла на 5-й позиции контроллера машиниста, не обеспеченный соответствующим повышением давления масла в системе смазки двигателя и соответственно в масляном клине подшипниковых узлов коленчатого вала.

Устранение указанных составляющих является важной задачей, в решении которой заинтересованы все причастные к производству и эксплуатации дизелей стороны. В настоящее время к числу мероприятий по стабилизации положения с выходом из строя подшипниковых узлов, разработанных на основании предварительных исследований, проведенных ВНИИЖТом и ВНИКТИ, а также опыта эксплуатации тепловозов ТЭМ18Д в линейных предприятиях относятся следующие.

1. Изменение схемы включения водомасляного теплообменника в систему охлаждения тепловоза с введением его в «холодный» контур; вывод из схемы охлаждения регулятора температуры РТП-65 с обеспечением постоянного охлаждения масла в ВМТ. Введением водомасляного теплообменника в «холодный» контур обеспечивается стабильный и эффективный отвод тепла от моторного масла, температурный режим которого находится в пределах, рекомендованных заводом-изготовителем дизелей.

2. Увеличение объема заправляемого в картер дизеля моторного масла до 460 – 480 кг. Дополнительный объем масла способствует также меньшей интенсивности его нагрева и, как следствие этого, – стабилизации величины среднего значения кинематической вязкости.

3. Замена бронзовых подшипников на сталеалюминиевые с антифрикционным слоем из сплава АО10С2 с повышенными показателями усталостной прочности.

4. Перенастройка перепускного клапана масляного насоса на давления 0,55 МПа, что способствовало повышению среднего давления масла в системе смазки дизеля.

В отношении пересмотра настроек угла опережения впрыска топлива в сочетании с корректировкой профиля кулачковой шайбы вала топливного насоса, а также настроек мощности по рабочим позициям дизеля до настоящего времени никаких работ пока не проведено. Выполнение исследований данной составляющей проблемы дает основание надеяться на полное ее решение и получение в конечном итоге современного, надежного, экономичного и эффективно работающего дизеля для нового поколения маневровых тепловозов.

## Список литературы

1. Марков, Н. Н. Дизель-генераторы 1-ПДГ4Д, 1-ПДГ4Д-1. Руководство по эксплуатации 1-ПДГ4Д РЭ [Текст]: В 2 ч. / Н. Н. Марков / ОАО Пензадизельмаш. Пенза, 2006. – Ч.1. – 217 с.

2. Тепловоз ТЭМ18ДМ. Руководство по эксплуатации [Текст]: В 3 т. /ЗАО УК БМЗ. Брянск, 2009. – Т. 1.– 156 с.

3. Плахотин, Б. И. Анализ технического состояния тепловозного парка по сети железных дорог России за 2008 г. [Текст] / Б. И. Плахотин / ОАО «РЖД». Департамент локомотивного хозяйства. – М., 2009. – 92 с.

# Транспортная энергетика

4. Обельницкий, А. М. Топливо и смазочные материалы [Текст] / А. М. Обельницкий. – М.: Высшая школа, 1982. – 208 с.
5. Кулешов, А. С. Программа расчета и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛЬ-РК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач [Текст] / А. С. Кулешов / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2004. – 123 с.
6. Федотов, Г. Б. Топливные системы тепловозных дизелей. Ремонт, испытание, совершенствование [Текст] / Г. Б. Федотов, Г. И. Левин. – М.: Транспорт, 1983. – 192 с.

УДК 662.61.502.36

В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, М. В. Кокшаров

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАК ВАЖНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Выполнен анализ разведанных запасов основных энергетических ресурсов (нефти и газа) на перспективу до 2030 г. в разных странах мира и прогноз добычи угля, нефти и газа в России до 2020 г. Приведены приблизенная оценка эффективности инженерно-технических мероприятий для котельных малой мощности и некоторые результаты испытаний котлов фирмы «Октан» на газе.

Современная структура топливно-энергетического баланса в значительной степени определяется заметным истощением запасов нефти и продолжающимся повышением мировых цен на нефть, превысивших уровень 50 долларов за баррель (158,987 л). Мировые ресурсы разведанных месторождений составляют около 150 млрд т нефти (из них в странах бывшего СССР – примерно 10 млрд т, или около 7 % мировых запасов нефти) [1]. Россия добывает около 10 % от мирового производства нефти [1]. Однако основными поставщиками жидких углеводородов на мировой рынок являются страны Ближнего Востока (Ирак, Саудовская Аравия, Иран), обладающие наибольшими сырьевыми ресурсами (рисунок 1) [2].

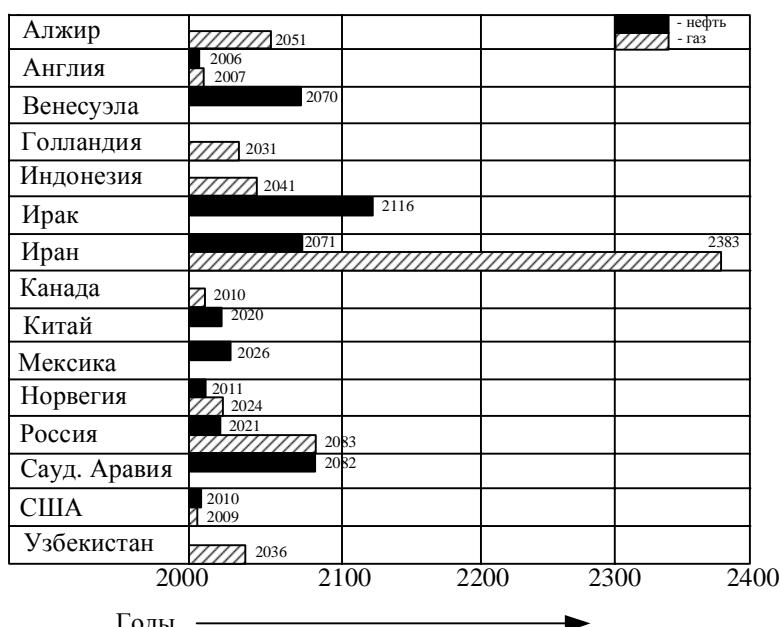


Рисунок 1 – Разведанные запасы полезных ископаемых в разных регионах мира (по данным организации стран – экспортёров нефти ОПЕК) с указанием прогнозируемых сроков истощения месторождений нефти и природного газа

# Транспортная энергетика

В настоящее время в мире ежегодно добывается около 3 млрд т нефти. При сохранении такого уровня добычи нефти ее запасов может хватить на 50 лет. Причем из-за роста спроса на нефть будет непрерывно нарастать ее дефицит, который к 2025 г. достигнет 16 млн баррелей в день.

В Российской Федерации ситуация осложняется прогнозируемым падением добычи нефти после 2010 г. К этому времени Россия будет испытывать дефицит нефтепродуктов в размере до 10 млн т в год [1]. В то же время добыча каменного угля и природного газа в период до 2020 г. будет увеличиваться (рисунок 2) [3]. Поэтому рациональное энергосбережение является главной задачей в практике эксплуатации теплоэнергетического оборудования в промышленной сфере и жилищно-коммунальном хозяйстве. Для решения такой задачи требуются разработка и внедрение энергосберегающих технологий с минимальным удельным расходом энергоресурсов. Это в значительной мере относится к котельным малой и средней мощности [5 – 7].

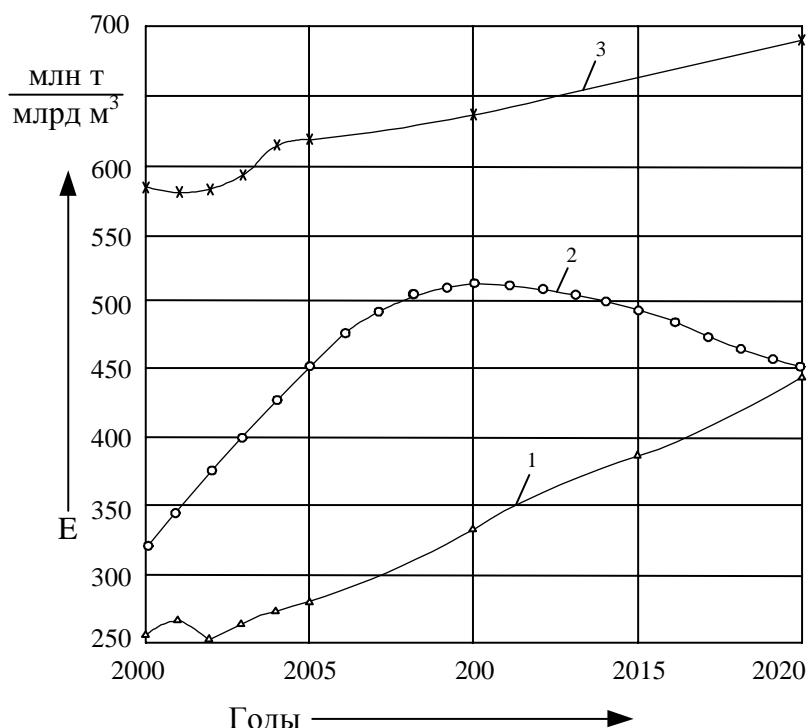


Рисунок 2 – Прогноз добычи каменного угля (1), нефти (2) и природного газа (3) в России на период до 2020 г.

Причины отклонения от исходного оптимального режима, на который котел настраивается при его пуске, – естественная разрегулировка топливосжигающих устройств, смена вида топлива, его сорта или качества и т. д. В любом случае результатом является нерациональное (неоптимальное) использование топлива, например, его неполное сгорание, увеличение выбросов вредных веществ в окружающую среду. Учитывая, что малых котельных существует большое количество, обеспечение постоянного контроля за режимами работы становится серьезной народнохозяйственной проблемой как в области энергосбережения, так и в области охраны окружающей среды [4 – 8].

Анализ материалов по экономии и рациональному расходованию топлива и топливно-энергетических ресурсов применительно к промышленным предприятиям, потребляющим тепловую энергию, позволяет наметить следующие основные направления экономии топлива: технические мероприятия, касающиеся энергоустановок, вырабатывающих тепловую энергию; технические мероприятия, касающиеся потребителей тепловой энергии; организационные мероприятия, позволяющие более точно нормировать расход тепловой энергии потребителями.

# Транспортная энергетика

Оценка эффективности технических мероприятий для повышения экономичности котельных установок приведена в таблице [9]. Как следует из данных этой таблицы, наибольший эффект дают следующие технические мероприятия: дополнительный подогрев питательной воды котла благодаря использованию бросовой теплоты выпускных газов; перевод котлов с твердого и жидкого топлива на газообразное; уменьшение накипеобразования на поверхностях нагрева котлов; переоборудование паровых котлов в водогрейные.

Приближенная оценка эффективности мероприятий по изменению экономичности котельных установок

Мероприятие	Экономия топлива, %	Перерасход топлива, %
Снижение подсоса воздуха по газовому тракту котельной установки	0,5	–
Увеличение коэффициента избытка воздуха в топке на 0,1	–	0,7
Увеличение температуры питательной воды на входе в барабан котла на 10°C (р = 0,13 МПа и $\eta_k = 0,8$ )	2,0	–
Увеличение температуры питательной воды на входе в водяной экономайзер на 10°C	–	0,23 – 0,24
Подогрев питательной воды в водяном экономайзере на 6°C	1,0	–
Уменьшение температуры выпускных газов на 10°C	0,6 – 0,7	–
Установка водяного поверхностного экономайзера	4 – 7	–
Установка водяного поверхностного экономайзера при температуре газа на входе 150 – 200°C	12 – 15	–
Отклонение содержания CO <sub>2</sub> от оптимального значения на 1%	–	0,6
Перевод котла с каменного и бурого угля на природный газ	6 – 10	–
Отложение накипи на внутренних сторонах поверхностей нагрева на 1 мм	–	2,0
Расход пара на распыление мазута в форсунках	–	2,5 – 4
Забор теплого воздуха из верхней зоны котельного зала на каждые 10 тыс. м <sup>3</sup>	0,013 т условного топлива	2,5 – 4
Уменьшение размера продувки на 1%	0,3	–
Установка обдувочного устройства для очистки наружных поверхностей нагрева	2 – 3	–
Автоматизация процессов горения и питания котлов	1 – 4	–
Наладка и эксплуатация котельной установки по контрольно-измерительным приборам, не менее	3 – 5	–

Технические мероприятия по экономии топлива, касающиеся потребителей тепловой энергии, весьма разнообразны. Наиболее целесообразно эти вопросы решать непосредственно для конкретного промышленного предприятия. К таким мероприятиям можно отнести более полное и качественное утепление производственных и жилых помещений; снижение или полное отключение выдачи теплоты нагревателям в период длительного (более 7 – 8 ч) отсутствия людей в помещении (в цехе, на участке и т. д.), а в остальное время поддержание температуры в помещении не более рекомендуемой санитарными нормами; более качественную теплоизоляцию трубопроводов (особенно паровых); снижение утечек пара и воды; более полную утилизацию теплоты отработанного технического пара и т. д.

# Транспортная энергетика

Расчеты показывают что наличие 1 м<sup>2</sup> неизолированного паропровода с давлением 0,5 МПа приводит к перерасходу условного топлива на 0,4 кг/ч, а парение через отверстие 1мм<sup>2</sup> при 0,7 МПа – на 3,6 кг/ч.

При работе котлов необходим постоянный или периодический контроль за составом продуктов горения, позволяющий определить степень завершенности процесса сгорания (количество продуктов неполного сгорания), условия сгорания топлива (коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ ) и т. д.

При неполном сгорании топлива в продуктах сгорания могут быть окись углерода, водород, метан и другие углеводороды.

Метан в выпускных газах может вызвать неравномерность смешения топлива с воздухом, наличие локальных низкотемпературных зон и др. Оценивать химическую неполноту сгорания топлива только по присутствию в продуктах горения CO, особенно при сжигании природного газа, недопустимо, поскольку наличие в продуктах горения даже небольшого количества метана приводит к значительным ошибкам в определении химической неполноты сгорания топлива.

Иногда при испытаниях контроль за избытком воздуха ведут только по содержанию CO<sub>2</sub>. Однако у такого метода контроля топочного режима есть ряд недостатков. Содержание CO<sub>2</sub> в продуктах горения при наличии химической неполноты сгорания не определяется однозначно избытком воздуха даже при постоянном составе топлива. Одно и то же значение CO<sub>2</sub> может соответствовать двум разным значениям  $\alpha$ . Снижение CO<sub>2</sub> может быть вызвано, с одной стороны, увеличением подачи воздуха в систему, а с другой – его снижением, сопровождающимся значительными потерями теплоты с химической неполнотой сгорания.

Для правильного ведения топочного режима необходим (наряду с другими газами) контроль за содержанием кислорода в выпускных газах. Только в этом случае можно быть уверенным в правильном определении  $\alpha$ .

Во время испытаний систематически проверяют правильность и закономерность газового анализа. При этом необходимо учитывать, что при отсутствии догорания газов в газоходах котла содержание в продуктах горения RO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> будет постепенно уменьшаться из-за подсоса воздуха по мере удаления исследуемого сечения газохода от топки, а содержание O<sub>2</sub> – увеличиваться [8, 9].

Содержание RO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> контролируют по отдельным сечениям газохода. Результаты анализа газа в каком-либо сечении газохода принимают за наиболее достоверные. Такое сечение называется достоверным.

Содержание RO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> за выбранным достоверным сечением при отсутствии химической неполноты сгорания контролируют по формуле:

$$Q_2^{\text{II}} = \left[ RO_2^{\text{II}} O_2^{\text{I}} + 21(RO_2^{\text{I}} - RO_2^{\text{II}}) \right] / RO_2^{\text{I}},$$

где RO<sub>2</sub><sup>I</sup> и O<sub>2</sub><sup>I</sup> – содержание RO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> в наиболее достоверном сечении газохода;

RO<sub>2</sub><sup>II</sup> и Q<sub>2</sub><sup>II</sup> – то же, во втором (произвольном) сечении газохода.

Для контроля за составом газа наиболее часто применяют газоанализаторы волюметрического и хроматографического типов [8, 9].

Газоанализаторы волюметрического типа (ГХП-2, ГХП-3, ГХП-3М) предназначены для определения RO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и CO. Их широко используют в производствах с небольшим количеством анализов, где погрешность измерений составляет 2 – 4 %.

# Транспортная энергетика

В последнее время все чаще в контроле за составом выпускных газов применяют хроматографические методы контроля. С помощью хроматографов можно определить любые горючие и негорючие газы. У хроматографических газоанализаторов более высокая точность измерения, чем у волюметрических. Недостатки хромотографических газоанализаторов — длительная подготовка к работе, необходимость источника питания, использование специальных газоносителей.

По результатам газового анализа определяют тепловые потери котла с выпускными газами и из-за химического недожога.

В современных котельных периодический контроль за котлом следует заменить на непрерывный, что позволит добиться наибольшей экономичности его работы.

Известно, что режимы работы промышленных котлов и установок определяются и регулируются на основе измерений тепловых характеристик сжигания топлива в топке и показателей утилизации, переработки и транспортировки отходящих газов в атмосферу через дымовую трубу. Тепловые характеристики зависят от полноты сгорания топлива, а экологические — от степени выполнения требований нормативных документов относительно уровня выбросов дымовых газов и содержания в них CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH и других токсичных газов, а также от утечек этих компонентов в рабочую зону помещения котельных.

При наладке топливосжигающего оборудования специализированными организациями оптимизируются режимы его работы с учетом требований максимального энергосбережения и минимального загрязнения окружающей среды вредными выбросами [4]. По результатам настройки составляется режимная карта, в которой наряду с другими многочисленными параметрами указываются концентрация CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, NO, температура отходящих топочных газов и дутьевого воздуха, коэффициент избытка воздуха за топочной камерой, КПД котла и соответствующим этим показателям оптимальный расход натурального и условного топлива на 1 Гкал выработанной и отпущененной теплоты. Режимная карта утверждается ведомственной топливной инспекцией и является инструктивным документом для технического персонала, обслуживающего котлоагрегат.

На рисунке 3 представлены полученные при испытаниях пусконаладочной группой фирмы ООО ПФ «Октан» экспериментальные данные о составе уходящих газов, значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и КПД брутто водогрейного  $\eta$  котла КВСА-2. С увеличением теплопроизводительности котла экологические показатели улучшаются, а КПД брутто остается практически постоянным.

Состав уходящих газов за котлом определяли с помощью анализатора топочных газов Drager MSI 150 EURO, который был сертифицирован в системе TUV (немецкая техническая надзорная организация) для всех измерительных каналов. Техническая характеристика анализатора и результаты его аттестации приведены в работе [4].

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Выполнен ретроспективный анализ разведанных запасов полезных ископаемых сырьевых стран на долгосрочную перспективу.

2. Для России результаты прогнозных исследований добычи угля, нефти и газа позволяют говорить о постепенном спаде добычи нефти, начиная с 2010 г., а добыча газа и угля будет расти вплоть до 2020 г.

3. Выполненная оценка эффективности работы стационарных котельных малой мощности позволила разработать комплекс инженерных и организационных решений по повышению экономичности энергоисточников внедрением эффективных методов теплотехнического контроля котлоагрегатов.

# Транспортная энергетика

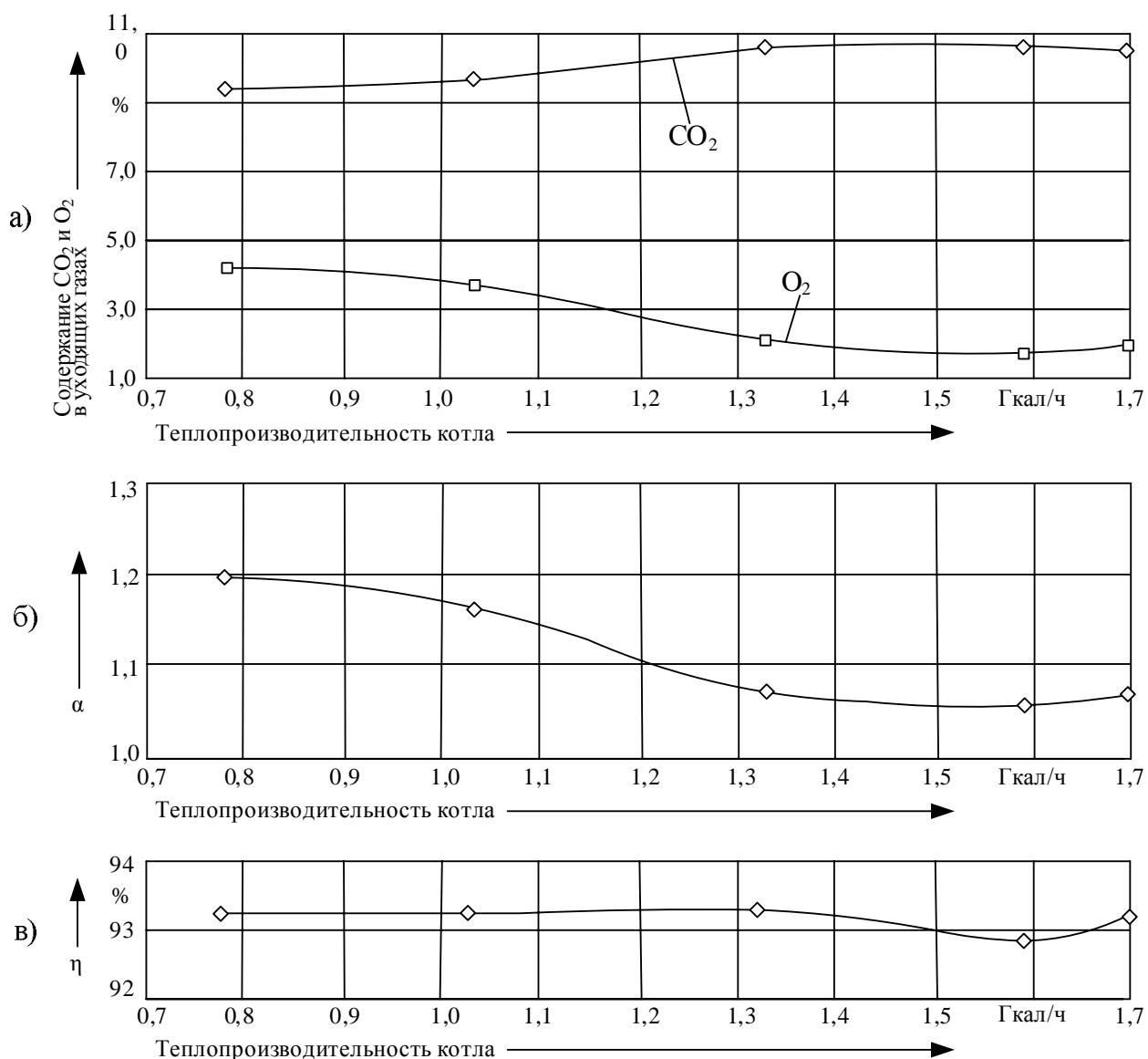


Рисунок 3 – Результаты пусконаладочных испытаний водогрейного котла типа KVCA-2 Омской фирмы ООО ПФ «Октан» на природном газе (газовая горелка ГГкБ-2,2)

## Список литературы

1. Работы дизелей на нетрадиционных топливах [Текст] / В. А. Марков, А. И. Гайворонский и др. – М.: Легион-Автодата, 2008. – 464 с.
2. Пронин, Е. Н. В поисках ответов [Текст] / Е. Н. Пронин // Автозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2003. – № 6. – С. 5 – 11.
3. Григорьев, М. В центре внимания – центры нефтедобычи [Текст] / М. Григорьев // Нефть России. – 2004. – № 3. – С. 32 – 34.
4. Актуальные задачи коммунальной теплоэнергетики Омского региона [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2006. – Вып. 4. – С. 104 – 108.
5. Алешина, М. Основа добрых перемен [Текст] / М. Алешина // Энергосбережение и энергетика в Омской области. – 2006. – № 2 (19). – С. 3 – 6.
6. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: Монография [Текст] / П. А. Щинников, Г. В. Ноздренко и др. / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2005. – 528 с.

7. Томилов, В. Г. Проблемы теплообеспечения жилищно-коммунального комплекса [Текст] / В. Г. Томилов // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2004. – Вып. 8. – С. 249 – 263.

8. Пономаренко, И. С. Газоанализатор «Топаз-01» – топливосберегающий и природо-охранный измерительный прибор [Текст] / И. С. Пономаренко, И. А. Серова // Промышленная энергетика. – 2003. – № 6. – С. 13 – 16.

9. Селиверстов, В. М. Экономия топлива на речном флоте [Текст] / В. М. Селиверстов, М. И. Braslavskiy. – M.: Транспорт, 1983. – 231 с.

---

УДК 624.332:621.316.97

А. М. Ерита, В. А. Кандаев, К. В. Авдеева

## ПАРАМЕТРЫ ИЗОЛИРОВАННОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

*В статье определены параметры изолированного цилиндрического проводника в однородной среде.*

Распределение электрических величин в линейном источнике, расположенному в однородной среде, определяется геометрическими размерами источника, материалом, из которого он изготовлен, наличием изолирующего покрытия, его конструкцией и свойствами, а также параметрами земли (среды, в которой располагается проводник). Под линейным источником будем понимать протяженное металлическое сооружение, которое может быть как с изолирующим покрытием, так и без него, по нему протекает электрический ток как за счет внешнего источника, подключенного к нему, так и за счет электромагнитных связей с другими сооружениями. Термин «источник» понимается в смысле источника электромагнитного поля, которое возникает в пространстве, окружающем проводник, и в самом проводнике. Примером названного выше источника могут быть кабели электроснабжения или связи или их металлические покровы, которые представляют собой однопроводные цепи (линии) с распределенными по длине параметрами с возвратом тока через землю, рельсовые цепи, трубопроводы различного назначения, элементы заземляющих систем и т. д. Распределение тока и потенциала в них описывается системой дифференциальных уравнений, для решения которых должны быть известны их первичные и волновые параметры.

Определим параметры электромагнитного поля для однородной среды (земли). В общем случае параметры земли – ее удельное сопротивление  $\rho_3$  или обратная величина, проводимость земли  $\sigma_3$  – являются величинами переменными. Удельная проводимость зависит от многих трудно учитываемых факторов, таких как температура земли, ее влажность, минералогический состав, количество слоев и их мощность [1]. В настоящее время многие специалисты стремятся получить решение задачи по определению параметров электромагнитного поля для общего случая, т. е. для  $N$ -слойной земли. Однако это приводит к громоздким, не решаемым аналитически выражениям, которые трудно применять для решения практических задач. Поэтому многослойную структуру, как правило, приводят к эквивалентной двухслойной. Для промышленных площадок, территорий тяговых подстанций или домов связи, а также вблизи рельсовой цепи такое эквивалентирование не совсем оправданно по причине изменения структуры и состава земли в период выполнения строительно-монтажных работ. Например, при строительстве заземляющего устройства тяговой подстанции верхний слой земли привозной, поэтому ее проводимость будет отличаться от проводимости коренных пород. Кроме того, для определения технического состояния подземного сооружения особенность задачи такова, что решения необходимо искать в ближней к источнику зоне, в которой

электромагнитное поле формируется источником и является первичным. Именно параметры первичного поля функционально связаны с электрическими величинами источника, которые в свою очередь определяются параметрами этого источника и имеющимися неоднородностями, в качестве которых могут быть места повреждения изоляции кабеля, изменения геометрических размеров элементов заземляющего устройства по причине коррозионного разрушения, отсутствие электрического контакта между отдельными элементами заземляющего устройства или же, наоборот, наличие этого контакта и т. д.

Неоднородности земли формируют вторичные поля, которые являются определяющими при расчете поля в дальней зоне или в зоне индукции [2]. Параметры вторичного поля находятся в сложной зависимости от параметров источника и в большей степени определяются параметрами и структурой вмещающей среды, т. е. земли. Таким образом, вторичные поля для решаемых задач следует рассматривать в качестве помехи, и их влияние необходимо исключать всеми способами. Параметры вторичного электромагнитного поля информативны относительно структур, их породивших, успешно применяются в геофизике при разведке полезных ископаемых и определении их характеристик. Поэтому решение задач по определению параметров электромагнитного поля и параметров линейных источников будет проводиться для однородного строения земли и бесконечно длинной линии.

Рассмотрим вектор-потенциальную функцию гармонического тока, протекающего по изолированному цилиндрическому проводнику, расположенному в безграничной среде (рисунок 1).

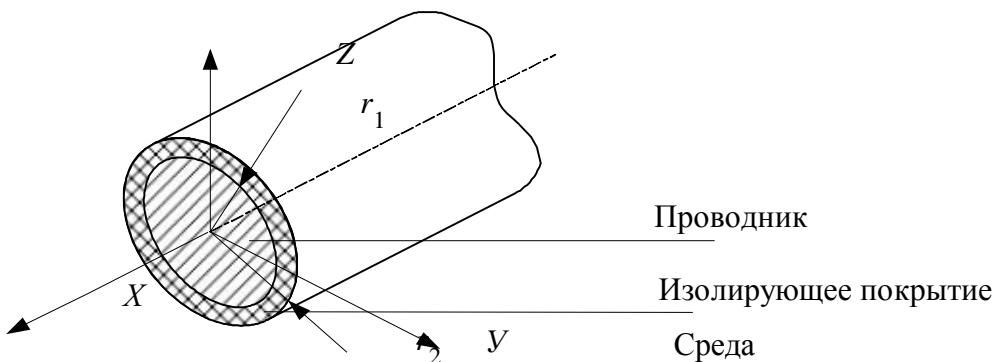


Рисунок 1 – Схема изолированного проводника в безграничной среде

Волновое уравнение

$$\Delta A - m^2 A = 0 \quad (1)$$

совместно с граничными условиями определяет величину векторного и скалярного потенциала, а следовательно, и компонент электромагнитного поля. Поскольку поле линейного источника в безграничном пространстве имеет цилиндрическую симметрию, то вектор-потенциальная функция имеет единственную составляющую, направленную вдоль линейного проводника [3].

Уравнение (1) в цилиндрической системе координат примет вид:

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_x}{\partial r} - m^2 A_x = 0, \quad (2)$$

где  $r = \sqrt{y^2 + z^2}$ ;

# Транспортная энергетика

$$m^2 = \kappa^2 - \gamma^2;$$

$\kappa = \sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\varepsilon\mu}$  – волновое число среды, 1/м;

$\omega$  – круговая частота, рад/с;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды, Гн/м;

$\sigma$  – удельная проводимость среды, См/м;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

$\gamma$  – коэффициент распространения тока в проводнике, 1/м.

Решение уравнения (2) записывается через модифицированные функции Бесселя  $I_0$  и  $K_0$  [4]. Считается, что величина тока по длине проводника изменяется по закону  $I_x = I_h e^{-\gamma x}$ :

$$A_x = [AK_0(mr) + BI_0(mr)], \quad (3)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные, определяемые из граничных условий. Для вектор-потенциальной функции в проводнике в выражении (3) следует принять  $A = 0$ , поскольку при  $r \rightarrow 0 K_0(mr) \rightarrow \infty$ .

В проводнике  $A_x^{(1)} = B_1 I_0(m_1 r)$  для определения коэффициента  $B_1$  перейдем от вектор-потенциальной функции к напряженности магнитного поля  $H_\phi^{(1)}$ . Значение  $B_1$  для поверхности проводника можно определить из закона полного тока  $I = H 2\pi r$ :

$$H_\phi^{(1)} = \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} A_x^{(1)} = \frac{B_1}{\mu} \operatorname{rot}[I_0(m_1 r)] = \frac{B_1}{\mu} m_1 I_1(m_1 r_1) = \frac{I_x}{2\pi r_1}, \quad (4)$$

где  $m_1 = \sqrt{\kappa_1^2 - \gamma^2}$ ;

$r_1$  – радиус провода;

$$B_1 = \frac{I_x \mu}{2\pi r_1 m_1 I_1(m_1 r_1)}. \quad (5)$$

Напряженность магнитного поля в проводнике

$$H_\phi^{(1)} = \frac{I_x I_1(m_1 r)}{2\pi r_1 I_1(m_1 r_1)}. \quad (6)$$

Из уравнения Максвелла определим  $E_r$  и  $E_x$ :

$$\frac{\partial H_\phi}{\partial x} = -(\sigma + j\omega\varepsilon)E_r = -\tilde{\sigma}E_r; \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(rH_\phi) = r\tilde{\sigma}E_x, \quad (8)$$

откуда:

$$E_r^{(1)} = \frac{I_x \gamma}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1} \frac{I_0(m_1 r)}{I_1(m_1 r_1)}; \quad (9)$$

$$E_x^{(1)} = \frac{I_x m_1}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1} \frac{I_0(m_1 r)}{I_1(m_1 r_1)}. \quad (10)$$

Решение уравнения (2) для диэлектрика, окружающего линейный проводник, запишется так:

$$A_x^{(иэ)} = A_{иэ} K_0(m_{иэ} r) + B_{иэ} I_0(m_{иэ} r). \quad (11)$$

По известному значению вектор-потенциальной функции определяются компоненты по-

# Транспортная энергетика

ля в диэлектрике:

$$H_{\phi}^{(и3)} = \frac{m_{и3}}{\mu} [A_{и3} K_1(m_{и3} r) + B_{и3} I_1(m_{и3} r)]; \quad (12)$$

$$E_r^{(и3)} = \frac{m_{и3} \gamma}{\mu \tilde{\sigma}_{и3}} [A_{и3} K_1(m_{и3} r) + B_{и3} I_1(m_{и3} r)]; \quad (13)$$

$$E_x^{(и3)} = \frac{m_{и3}^2}{\mu \tilde{\sigma}_{и3}} [B_{и3} I_0(m_{и3} r) + A_{и3} K_0(m_{и3} r)]. \quad (14)$$

При определении постоянных  $A_{и3}$  и  $B_{и3}$  воспользуемся граничными условиями на границе «металл – диэлектрик» и «диэлектрик – среда». Для границы раздела «металл – диэлектрик» при  $r = r_1$  имеем:

$$H_{\phi}^{(и3)} = \frac{I_x}{2\pi r_1} = \frac{1}{\mu} [A_{и3} m_{и3} K_1(m_{и3} r_1) + B_{и3} m_{и3} I_1(m_{и3} r_1)], \quad (15)$$

и для второй границы при  $r = r_2$ :

$$H_{\phi}^{(и3)} = \frac{I_x}{2\pi r_2} = \frac{1}{\mu} [A_{и3} m_{и3} K_1(m_{и3} r_2) + B_2 m_{и3} I_1(m_{и3} r_2)]. \quad (16)$$

Из соотношений (15) и (16) определяются постоянные:

$$A_{и3} = \frac{\mu I_x}{2\pi m_{и3} r_1 r_2} \left[ \frac{r_1 I_1(m_{и3} r_1) - r_2 I_1(m_{и3} r_2)}{I_1(m_{и3} r_1) K_1(m_{и3} r_2) - I_1(m_{и3} r_2) K_1(m_{и3} r_1)} \right]; \quad (17)$$

$$B_{и3} = \frac{\mu I_x}{2\pi m_{и3} r_1 r_2} \left[ \frac{r_2 K_1(m_{и3} r_2) - r_1 K_1(m_{и3} r_1)}{I_1(m_{и3} r_1) K_1(m_{и3} r_2) - I_1(m_{и3} r_2) K_1(m_{и3} r_1)} \right]. \quad (18)$$

Для внешней среды постоянные  $A_2$  и  $B_2$  определяются из следующих условий:

$$\begin{cases} H_{\phi} \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty; \\ H_{\phi} = \frac{I_x}{2\pi r_2} \text{ при } r = r_2. \end{cases} \quad (19)$$

В этом случае следует  $B_2$  принять равной 0, поскольку при  $Z \rightarrow \infty I_0(m_2 r) \rightarrow \infty$ . Используя соотношения (9) для внешней среды, вектор-потенциальную функцию и компоненты электромагнитного поля можно записать в виде:

$$\begin{cases} A_x^{(2)} = \frac{I_x \mu K_0(m_2 r)}{2\pi m_2 r_2 K_1(m_2 r_2)}; \\ H_{\phi}^{(2)} = \frac{I_x K_1(m_2 r)}{2\pi r_2 K_1(m_2 r_2)}; \\ E_r^{(2)} = \frac{I_x \gamma K_1(m_2 r)}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}; \\ E_x^{(2)} = \frac{I_x m K_0(m_2 r)}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}. \end{cases} \quad (20)$$

Таким образом, получены точные решения для составляющих электромагнитного поля в проводнике, в изолирующем покрытии и во внешней среде.

Определенный интерес представляют однородные линии, параметры которых остаются

неизменными по всей длине линии. Вблизи концов линии отраженные волны взаимодействуют с падающими, изменяя общее распределение электрических величин, через которые определяются параметры. Подобные явления происходят вблизи любых неоднородностей, которых на любой линии имеется достаточно большое количество, и если параметры определять с учетом неоднородностей линии, то они не будут постоянны по длине и будут находиться в противоречии с определением «параметры». Поэтому нет никаких оснований считать первичные параметры переменными величинами вблизи концов линии. Влияние концов линии учитывается не через параметры, зависящие от координат, а из решения уравнений, описывающих распределение электрических величин по длине линии.

При определении постоянной распространения изолированного проводника воспользуемся граничным условием [6], которое связывает тангенциальные составляющие электрического поля по обе стороны изолирующего покрытия:

$$E_x^{(1)} + \frac{\tilde{\sigma}_{\text{из}} h_{\text{из}}}{\tilde{\sigma}_{\text{из}}} \cdot \frac{\partial E_2^{(1)}}{\partial x} = E_x^{(2)}. \quad (21)$$

Подставляя необходимые компоненты в граничное условие, запишем:

$$\frac{I_x m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} - \frac{\tilde{\sigma}_1 h_{\text{из}} I_x \gamma^2 I_1(m_1 r_1)}{\tilde{\sigma}_{\text{из}} 2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} = \frac{I_x m_2 K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}. \quad (22)$$

Из выражения (22) определим постоянную распространения:

$$\gamma^2 = \left[ \frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{\tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} + \frac{r_1 m_2 K_0(m_2 r_2)}{r_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)} \right] \frac{\tilde{\sigma}_{\text{из}}}{h_{\text{из}}}. \quad (23)$$

Умножим и разделим второе слагаемое в выражении (23) на  $m_2$ :

$$\gamma^2 = \left[ \frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{\tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} + \frac{r_1 (\kappa_2^2 - \gamma^2) K_0(m_2 r_2)}{r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)} \right] \frac{\tilde{\sigma}_{\text{из}}}{h_{\text{из}}}. \quad (24)$$

Сгруппируем члены с  $\gamma^2$  и после сокращения на  $\tilde{\sigma}_{\text{из}}/h_{\text{из}}$  запишем:

$$\gamma^2 = \frac{\frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} + j\omega \frac{\mu}{r_2 m_2} \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}}{\frac{h_{\text{из}}}{r_1 \tilde{\sigma}_{\text{из}}} + \frac{1}{r_2 \tilde{\sigma}_2 m_2} \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}}. \quad (25)$$

Разделим числитель и знаменатель полученной дроби (25) на  $2\pi$ :

$$\gamma^2 = \frac{\frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} + \frac{j\omega \mu}{2\pi r_2 m_2} \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}}{\frac{h_{\text{из}}}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_{\text{из}}} + \frac{1}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 m_2} \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}} = (Z_{\text{вн}} + Z_{\text{в}}) Y_a. \quad (26)$$

В выражении (26) первое слагаемое в числителе является внутренним (собственным) сопротивлением проводника:

$$Z_{\text{вн}} = \frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)}, \quad (27)$$

# Транспортная энергетика

второе слагаемое – внешним (вносимым):

$$Z_{\text{вн}} = \frac{j\omega\mu}{2\pi r_2 m_2} \frac{K_0(m_1 r_1)}{K_1(m_2 r_2)}. \quad (28)$$

Знаменатель выражения (26) является полным переходным сопротивлением изолированного проводника:

$$Z_a = \frac{h_{\text{из}}}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_{\text{из}}} + \frac{1}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2} \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}; \quad (29)$$

$$Z_a = \frac{1}{Y_a}, \quad (30)$$

где  $Y_a$  – полная переходная проводимость изолированного проводника.

Слагаемое  $\frac{h_{\text{из}}}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_{\text{из}}}$  в полной переходной проводимости определяется геометрическими размерами и свойством изолирующего покрытия. Второе слагаемое определяется параметрами земли. Учитывая, что в тональном диапазоне частот аргументы функций Бесселя малы, можно воспользоваться разложением их в ряды и ограничить их первыми членами:

$$I_0(mr) \approx 1; \quad (31)$$

$$I_1(mr) \approx \frac{mr}{2}; \quad (32)$$

$$K_0(mr) \approx \ln \frac{1,12}{mr}; \quad (33)$$

$$K_1(mr) \approx \frac{1}{mr}. \quad (34)$$

Кроме того, в тональном диапазоне частот в выражении  $\tilde{\sigma}_{\text{из}} = \sigma_{\text{из}} + j\omega\epsilon$  выполняется условие:  $\sigma_{\text{из}} \ll j\omega\epsilon$ , поэтому можно записать:

$$\frac{h_{\text{из}}}{2\pi r_1 j\omega\epsilon} \approx \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi j\omega\epsilon} = (j\omega C)^{-1}. \quad (35)$$

С учетом принятых допущений

$$\gamma^2 = \frac{(\pi r_1^2 \tilde{\sigma}_1)^{-1} + \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2}}{(j\omega C)^{-1} + \frac{1}{2\pi \tilde{\sigma}_2} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2}}. \quad (36)$$

По известным значениям составляющих электромагнитного поля можно несколько иначе получить первичные параметры, входящие в  $\gamma$ . Внутреннее сопротивление проводника определится как отношение  $E_x^{(1)}$  на поверхности проводника к току:

$$Z_{\text{вн}} = \frac{E_x^{(1)}(r_1)}{I_x} = \frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)}. \quad (37)$$

# Транспортная энергетика

Для проводников в широком диапазоне частот выполняются условия [5]:

$$\sigma_1 \gg \omega \epsilon_1; \quad (38)$$

$$\omega \mu \sigma_1 \gg \gamma^2. \quad (39)$$

Умножив и разделив выражения (38), (39) на  $K_1$ , запишем:

$$Z_{\text{вн}} = \frac{j\omega \mu}{2\pi r_1 K_1} \frac{I_0(K_1 r_1)}{I_1(K_1 r_1)}. \quad (40)$$

Внешнее сопротивление проводника получим из условия [6]:

$$E_x^{(2)} = -Z_{\text{вн}} I_x = -j\omega A_x^{(2)}, \quad (41)$$

откуда:

$$Z_{\text{вн}} = \frac{j\omega \mu}{2\pi r_2 m_2} \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}. \quad (42)$$

Для определения переходной проводимости проводника  $Y_a$  воспользуемся соотношениями:

$$Y_a = \frac{I_{\text{ут}}}{\Phi}; \quad (43)$$

$$Z_a = \frac{1}{Y_a}, \quad (44)$$

где  $I_{\text{ут}} = \frac{\partial I_x}{\partial X}$  – ток утечки с проводника.

Потенциал изолированного проводника запишем так:

$$\Phi = \Delta \Phi + \Phi_3, \quad (45)$$

где  $\Delta \Phi$  – падение напряжения на изолирующем покрытии;

$\Phi_3$  – потенциал земли на поверхности изолированного проводника.

$$\Phi = \int_{r_1}^{r_2} E_r^{(\text{из})} dr + \int_{r_2}^{\infty} E_r^{(2)} dr. \quad (46)$$

Подставляя в первый интеграл выражения (45) значение  $E_r^{(\text{из})}$  из уравнения (13), получим:

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{\text{из}} &= \frac{m_{\text{из}} \gamma}{\mu \bar{\sigma}_{\text{из}}} A_{\text{из}} \int_{r_1}^{r_2} K_1(m_{\text{из}} r) dr + \frac{m_{\text{из}} \gamma}{\mu \bar{\sigma}_{\text{из}}} B_{\text{из}} \int_{r_1}^{r_2} I_1(m_{\text{из}} r) dr = \\ &= \frac{A_{\text{из}}}{\mu \bar{\sigma}_{\text{из}}} [K_0(m_{\text{из}} r_2) - K_0(m_{\text{из}} r_1)] + \frac{B_{\text{из}}}{\mu \bar{\sigma}_{\text{из}}} [I_0(m_{\text{из}} r_2) - I_0(m_{\text{из}} r_1)]. \end{aligned} \quad (47)$$

Значения  $A_{\text{из}}$  и  $B_{\text{из}}$  определяются выражениями (17) и (18). Второй интеграл в выражении (46)

# Транспортная энергетика

$$\varphi_3 = \int_{r_1}^{\infty} E_r^{(2)} dr = \int_{r_1}^{\infty} \frac{I_x \gamma K_1(m_2 r)}{2\pi r_2 \bar{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)} dr = \frac{I_x \gamma K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \bar{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}. \quad (48)$$

По известным значениям  $\Delta\varphi$  и  $\varphi_3$  можно определить  $Z_a$  из уравнений (43), (44):

$$Z_a = \frac{A'_{iz}}{\mu \tilde{\sigma}_{iz}} [K_0(m_{iz} r_2) - K_0(m_{iz} r_1)] + \frac{B'_{iz}}{\mu \tilde{\sigma}} [I_0(m_{iz} r_2) - I_0(m_{iz} r_1)] + \frac{K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}, \quad (49)$$

где  $A'_{iz} = \frac{A_{iz}}{I_x}$ ;  $B'_{iz} = \frac{B_{iz}}{I_x}$ .

Учитывая, что  $(m_{iz} r_1) \ll 1$ ,  $(m_{iz} r_2) \ll 1$ , можно воспользоваться соотношениями функций Бесселя для расчета малых аргументов:

$$Z_a = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_{iz}} + \frac{K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}. \quad (50)$$

С учетом формулы (35) выражения (29) и (50) для определения переходного сопротивления, полученные разными методами, совпадают.

Результаты сравнительных испытаний различных полимерных изолирующих покрытий показали, что их защитные свойства зависят от конструкции изолирующего покрова, свойств используемых материалов и технологии нанесения на защищаемую поверхность.

Изолирующие покровы шлангового типа обеспечивают лучшую защиту алюминиевой оболочки от коррозии по сравнению с ленточными [7]. Кроме того, наличие подклеивающего слоя и битумного компаунда между алюминиевой оболочкой и полимерным шланговым покрытием значительно повышает защитные свойства покрытия. Переходное сопротивление относительно земли уменьшается в первые месяцы эксплуатации на один – два порядка и составляет несколько мегаом.

Для проводников в полимерном изолирующем покрытии шлангового типа в тональном диапазоне частот выполняется условие:

$$(j\omega C)^{-1} >> \frac{K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)} \approx \frac{1}{2\pi \sigma_2} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2}, \quad (51)$$

$$\text{где } C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (52)$$

С учетом условия (46) выражение (33) запишется в виде:

$$\gamma = \sqrt{\left( \frac{1}{2\pi r_1^2 \sigma_1} + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2} \right) j\omega C}. \quad (53)$$

Емкость изолированного проводника относительно земли определяется выражением (52).

Результаты расчета  $\gamma$ , выполненные по выражениям (25) и (53), приведены на рисунке 2 (кривые 1 и 2 соответственно).

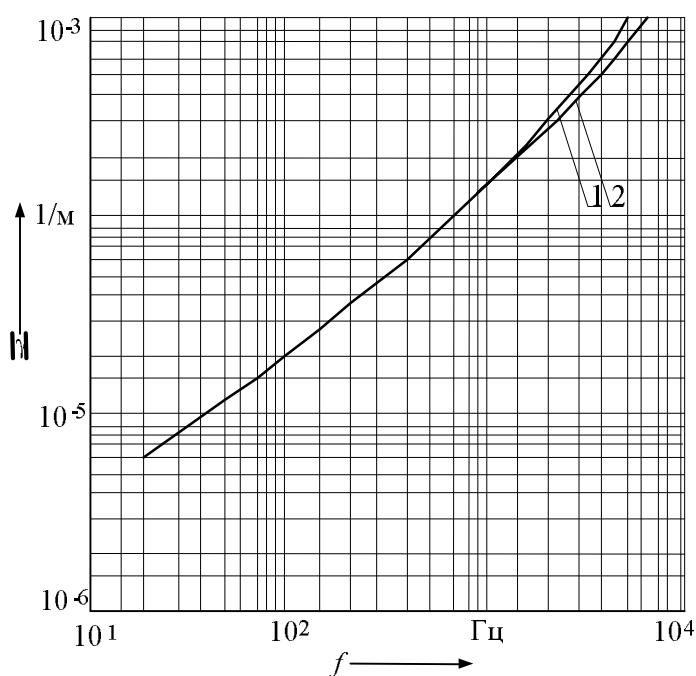


Рисунок 2 – Изменение модуля постоянной распространения изолированного алюминиевого проводника при  $\sigma_3 = 0,02$  см/м,  $d = 5,5$  мм

Волновое сопротивление проводника  $Z_{\text{волн}}$  определяется по формуле:

$$Z_{\text{волн}} = \sqrt{\frac{(Z_{\text{вн}} + Z_{\text{в}})}{Y_a}}. \quad (54)$$

Подставив в выражение (54) значения внутреннего и внешнего сопротивления проводника и переходной проводимости  $Y_a$ , определяемые по формулам (33), (38) и (39) соответственно, получим:

$$Z_{\text{волн}} = \sqrt{\left( \frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} + \frac{j\omega \mu}{2\pi r_2 m_2 K_1(m_2 r_2)} \right) \left( \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_{\text{из}}} + \frac{K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)} \right)}. \quad (55)$$

С учетом условия (46) и принятых допущений при определении  $\gamma$  выражение (55) записывается в виде:

$$Z_{\text{волн}} = \sqrt{\left( \frac{1}{\pi r_1^2 \sigma_1} + \frac{j\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2} \right) \left( (j\omega C)^{-1} + \frac{1}{2\pi \sigma_2} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2} \right)}. \quad (56)$$

Таким образом, с помощью выражений (35), (38), (45), (48), (51) можно определить параметры изолированного цилиндрического проводника в однородной среде.

## Список литературы

1. Электроразведка: Справочник геофизика [Текст] / Под ред. А. Г. Тархова. – М.: Недра, 1980. – 518 с.

2. Лавров, Г. А. Приземные и подземные антенны [Текст] / Г. А. Лавров, А. С. Князев. – М.: Советское радио, 1965. – 472 с.
3. Гринберг, Г. А. Основы точной теории волнового поля линий электропередачи [Текст] / Г. А. Гринберг, Б. Э. Бонштедт // Журнал технической физики. – 1954. – Т. 24. – Вып.1. – С. 67 – 95.
4. Бурсиан, В. Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке [Текст] / В. Р. Бурсиан. – Л.: Недра, 1972. – 367 с.
5. Вэнс, Э. Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели [Текст] / Э. Ф. Вэнс. – М.: Радио и связь, 1982. – 117 с.
6. Стрижевский, И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения [Текст] / И. В. Стрижевский, В. И. Дмитриев. – М.: Стройиздат, 1967. – 247 с.
7. Никольский, К. К. Коррозия и защита от нее подземных металлических сооружений связи [Текст] / К. К. Никольский. – М.: Связь, 1984. – 207 с.

---

УДК 621.1.016.536.25

В. С. Казачков, С. А. Когут

## УЧЕТ ЭНЕРГОСУРСОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ АСКУЭ

*В статье рассматривается автоматизированная комплексная система учета энергоресурсов (АСКУЭ), разработанная авторами, позволяющая вести учет различных ресурсов на основе уравнения баланса, связывающего измерения, произведенные приборами коммерческого учета для предприятия в целом, и показания приборов технического учета на отдельных объектах. Дается описание оригинальной методики учета тепловой энергии с помощью косвенных измерений, приведены сведения об аппаратной реализации АСКУЭ и экономическом эффекте от ее внедрения.*

В связи с переходом экономики страны с расточительного на ресурсо- и энергосберегающий путь развития проблема энергосбережения приобретает все большее значение. Неподелимой частью энергосбережения является и проблема учета энергоресурсов.

Все предлагаемые на рынке средства автоматизации учета энергоресурсов потребителей имеют достаточно высокую стоимость. Снизить удельные затраты, сократить сроки окупаемости таких систем можно только при комплексном учете энергоресурсов и выборе соответствующей аппаратной части.

Рассматриваемая ниже автоматизированная комплексная система учета энергоресурсов предназначена для организации учета потребления электрической и тепловой энергии, а также для учета расхода воды, газа, пара и т. п. Технические решения позволяют использовать ее для учета энергопотребления как на промышленных предприятиях, так и на объектах жилищно-коммунального хозяйства. Учет любого из регистрируемых параметров может производиться по многотарифной системе с использованием обычных однотарифных приборов.

Под АСКУЭ следует понимать такую систему, которая позволяет вести учет всех энергоносителей, используемых на предприятии, с разделением этого учета по территориально и (или) функционально выделенным участкам – узлам учета (УУ). Кроме этого она позволяет:

- а) определить уровень удельных затрат в единице выпасаемой продукции;
- б) оценить долю каждого энергоносителя в выделенном УУ относительно общего потребления предприятием соответствующего энергоресурса;
- в) определить основные направления по энергосбережению;
- г) оценить эффективность мероприятий, направленных на экономию энергоресурсов;

# Транспортная энергетика

д) снизить затраты на эксплуатацию и, как следствие, повысить эффективность эксплуатируемых первичных систем учета;

е) оценить текущее состояние и эффективность использования приборов учета;

ж) осуществить расчет по фактически потребленным энергоресурсам каждым территориально или функционально выделенным участком предприятия и предприятием в целом.

Актуальность индивидуального учета расхода электрической и тепловой энергии, горячей и холодной воды, газа повышается с ростом тарифов на эти виды энергоносителей, поскольку каждый потребитель заинтересован в оплате фактически использованных ресурсов.

Единый балансовый метод по учету и распределению между УУ всех видов потребляемых ресурсов должен быть базой для создания комплексных автоматизированных систем учета и распределения всех потребляемых ресурсов в выделенных на предприятиях участках.

Методическое обеспечение комплексных систем учета и распределения энергоресурсов должно представлять собой единообразный способ расчета потребления каждого ресурса. При этом необходимо, с одной стороны, гарантировать полную компенсацию затрат всех энергоснабжающих организаций, а с другой – справедливое распределение затрат за энергопотребление между всеми УУ.

Уравнение энергетического баланса предприятия для потребления любого ресурса может быть представлено в виде:

$$E_{\text{вх}} = E_o + E_n + E_{yy}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{вх}}$  – количество ресурса, измеренное входным прибором учета предприятия;

$E_o = \sum_j E_{oj}$  – количество ресурса, необходимое для общих нужд предприятия;

$E_n$  – потери ресурса внутри предприятия;

$E_{yy} = \sum_j E_{yyi}$  – потребление ресурса всеми УУ;

$j$  – количество структурных подразделений;

$i$  – количество точек учета соответствующего ресурса в выделенном УУ.

В уравнении (1) только значение  $E_{\text{вх}}$  обязательно должно измеряться средствами коммерческого учета. Остальные составляющие уравнения могут определяться средствами не только коммерческого, но и технического учета, а для некоторых видов ресурсов могут быть вычислены с помощью определенных алгоритмов.

Принцип разумности и справедливости требует, чтобы расходы на нужды предприятия распределялись пропорционально между количеством работников соответствующего участка предприятия, независимо от индивидуального потребления, в то время как оплата технически обоснованных потерь в структурных подразделениях должна начисляться пропорционально индивидуальному энергопотреблению каждого УУ. Тогда в соответствии с выражением (1) получаем:

$$E_{\text{опл}_j} = \left( 1 + \frac{E_n}{E_{yy}} \right) E_{yyi} + \frac{E_o}{N} P_j, \quad (2)$$

где  $E_{\text{опл}_j}$  – подлежащий оплате расход ресурса для  $j$ -го УУ;

$N$  – число работников предприятия, использующих потребление ресурса на общие нужды;

$P_j$  – число работников  $j$ -го УУ;

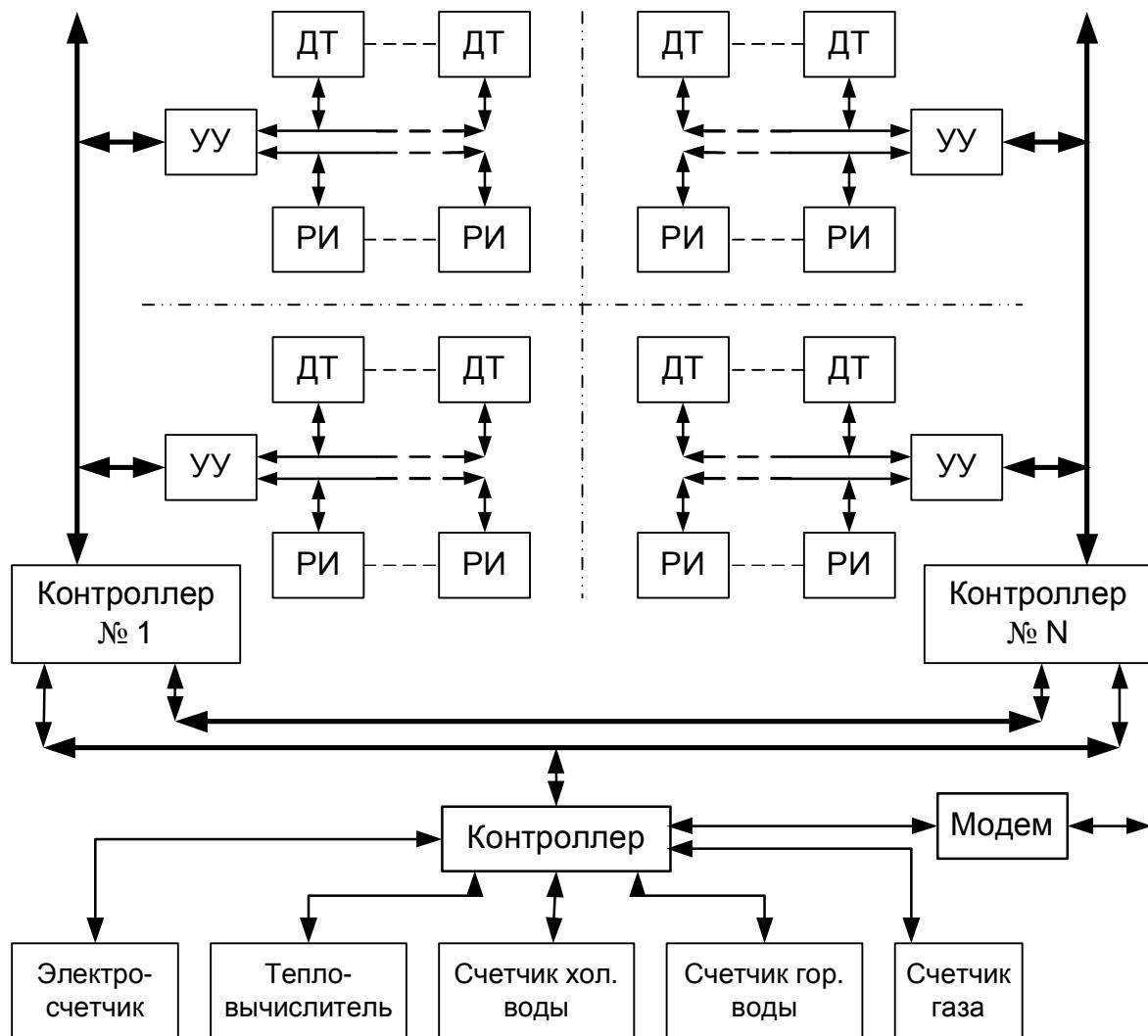
$E_{yyi}$  – расход ресурса по показаниям приборов, установленных на территории  $j$ -го УУ.

Система, построенная на основе рассмотренного балансового подхода состоит из компонентов, образующих три структурных уровня (рисунок 1):

а) приборы учета (ПУ);

# Транспортная энергетика

- б) узлы учета;
- в) контроллеры системы.



Структура АСКУЭ

Приборы учета представлены датчиками температуры (ДТ) и регистраторами импульсов (РИ) с подключенными к ним первичными приборами учета.

РИ предназначены для съема и хранения информации от датчиков расхода воды, газа, электрической энергии, дизельного топлива и т. п. ДТ позволяют определить разность температур, поэтому они устанавливаются попарно: один – на отопительный прибор, второй – на уровень пола. Разность температур в дальнейшем используется для расчета величины потребленной тепловой энергии.

Узлы учета позволяют сгруппировать датчики по территориальному признаку. Основная задача УУ – хранение данных о конфигурации подключенных к нему приборов и обеспечение доступа к ним для сбора данных. Благодаря наличию в УУ программируемого постоянного запоминающего устройства (ППЗУ) все сведения о ПУ, входящих в сеть учета, хранятся децентрализованно. Распределенная система позволяет уменьшить риск потери данных и упростить техническое обслуживание системы за счет сокращения времени выполнения операций.

Контроллеры системы (цеховые контроллеры, ЦК) предназначены для запуска программного обеспечения, выполняющего следующие функции:

- а) чтение конфигурации сети учета из памяти УУ;
- б) сбор информации от ПУ и ее хранение;
- в) предварительная обработка данных и расчет потребления ресурсов.

Результатом работы контроллеров являются массивы сведений о потреблении ресурсов.

Кроме того, задачей контроллеров является ведение журналов событий, хранящих системную информацию о тех или иных сбоях в работе УУ, ПУ и контроллеров, поступивших внешних командах, результатах их выполнения и т. п.

ЦК реализованы на базе промышленного контроллера ICP7188. Все контроллеры объединены в промышленную сеть на основе интерфейса RS485 с гальванической развязкой.

Один из контроллеров системы является ведущим, обеспечивая обмен с центральной системой учета (внешняя ЭВМ) и выполняя диспетчерские функции. Другая важная задача контроллера – опрос первичных приборов учета, предназначенных для измерения общего уровня потребления ресурсов всем объектом в целом. Кроме того, этот контроллер хранит всю служебную информацию, собирает файлы сведений о потреблении ресурсов и журналы событий, формируемые другими контроллерами. Необходимо отметить, что наличие нескольких копий (реплик) одной и той же информации повышает устойчивость работы системы учета в нестандартных ситуациях.

Обмен центральной системы учета с ведущими контроллерами осуществляется в пакетном режиме с помощью модема. Центральная система собирает всю информацию о расходе ресурсов и системных событиях. На основе полученной информации производится окончательный расчет величин потребленных ресурсов с учетом аппаратных и программных сбоев.

Вычислительные ресурсы ЭВМ используются также для обработки нештатных ситуаций – отключения питания, поломок аппаратной части, случаев мошенничества, аварийных ситуаций в коммунальных системах предприятия.

Система учета построена как однородная сеть однотипных элементов и создана на основе технологии MicroLAN, разработанной фирмой Dallas Semiconductor Inc. Сеть передачи данных 1-Wire® Net, известная также, как MicroLAN, – дешевая система обмена данными между промышленным контроллером и сетевыми устройствами. Разработчик сети производит широкий спектр устройств, поддерживающих протокол 1-Wire. Сюда входят счетчики, датчики температуры, элементы памяти (типа RAM и EEPROM), электронные ключи (iButton) и т. д. Как показал анализ, этот набор компонентов позволяет построить полнофункциональную систему учета расхода энергоресурсов.

Одно из главных достоинств сети – простота управления. Никакое сетевое устройство не может передавать данные, пока к нему не поступит запрос от ведущего узла. Обмен данными между устройствами также возможен только через ведущий узел. В сети возможен один и только один ведущий узел, в роли которого выступает промышленный контроллер, подключенный к сети с помощью интерфейса RS232 и адаптера MicroLAN.

Из изложенного видно, что по каждому УУ ведется комплексный учет всех энергоресурсов. Если в УУ имеется несколько вводов каких-либо ресурсов, то на уровне контроллеров эти данные объединяются. В итоге получают суммарное значение расхода этих ресурсов по данному УУ.

Рассмотрим более подробно вопрос об учете тепла в отдельных узлах учета. В мировой практике по учету тепловой энергии в локальных объектах, входящих в объединенную систему потребителей тепла, используются два основных подхода:

учет тепла с помощью электронных распределителей или распределителей испарительного типа;

учет с помощью теплосчетчиков – при горизонтальной разводке труб отопления.

Распределитель – автономный прибор, размещаемый непосредственно на радиаторе отопления и не имеющий каких-либо приспособлений для подключения его к другим устройствам. Показания распределителя пропорциональны средней температуре отопительного при-

бора за расчетный период. Показания с распределителя снимаются контроллерами один раз в год, после окончания отопительного сезона.

В течение отопительного сезона оплата производится по нормам, т. е. пропорционально квадратным или кубическим метрам здания (помещения), контролируемого УУ. Перерасчет за количество потребленной тепловой энергии для каждого УУ осуществляется специализированная организация, руководствуясь показаниями распределителей и общезаводского тепловычислителя с учетом технического состояния предприятия. Потребители узнают о количестве истраченного тепла лишь к началу следующего отопительного сезона. Оперативной информации о количестве потребленного тепла они не имеют. Таким образом, применение распределителей позволяет вести учет потребления тепла, но их невозможно использовать как первичные датчики для автоматизированных систем.

Использование тепловычислителей в качестве первичных приборов возможно только при горизонтальной разводке труб отопления. Их применение позволяет создать автоматизированную систему, но только систему по учету тепла. Для подключения к этой системе датчиков расхода воды и газа потребуется дополнительное оборудование, поскольку эти приборы имеют различные интерфейсы, но проблема не только в этом. Невозможно составить энергетический баланс. Сумма показаний тепловычислителей не равна показанию общезаводского тепловычислителя за тот же период времени. Это связано с тем, что тепловычислители, установленные в УУ, не учитывают затраты на обогрев тамбуров, коридоров, потери в общезаводской системе отопления и т. п. Кроме того, при малых расходах и разности температур, характерных для одного УУ, эти теплосчетчики дают большую погрешность.

Установка тепловычислителей на всех УУ предполагает применение горизонтальной разводки труб отопления, что приводит к значительному удорожанию как стоимости строительства, так и системы в целом за счет самих тепловычислителей.

Используемый способ учета тепловой энергии в предлагаемой АСКУЭ не имеет недостатков, перечисленных выше. Решение задачи измерения тепла в отдельно выделенном локальном объекте основано на способе, алгоритм которого изложен в патенте РФ № 23180219 [1].

Решение задачи по измерению тепловой энергии на выделенном участке цеха состоит в применении такого способа учета, который не зависит от разводки труб теплоснабжения. Суть его в следующем: в каждом территориально выделенном участке однотипно устанавливаются по одному термодатчику на все отопительные приборы. Для определения разности температур на уровне пола каждого отапливаемого помещения также однотипно устанавливаются термодатчики. Зная разность температур и площадь радиаторов, можно определить величину тепловой энергии. Способ определения количества тепла основан на использовании закона Ньютона - Рихмана.

Для расчета расхода тепла, например, в отдельно выделенном участке предприятия с вертикальной (традиционной) или горизонтальной разводкой труб отопления сначала определяют расход тепла по тепловому счетчику всего предприятия. С тепловым счетчиком связан один из контроллеров системы, в котором хранится информация о площади поверхности теплоотдачи по каждому УУ. Контроллер получает от цеховых контроллеров в определенные моменты времени данные о разности температур. Цеховые контроллеры через УУ постоянно фиксируют температуру на поверхности теплоотдачи отопительных приборов и температуру окружающей среды (воздуха на уровне пола в помещении).

Зная расход тепла по предприятию за конкретное время (по показаниям общезаводского теплового счетчика), контроллер определяет средний коэффициент теплосъема по объединенной системе потребителей тепла, который передается всем цеховым контроллерам, а на его основе каждый цеховой контроллер определяет расход тепла по конкретному локальному потребителю.

Таким образом можно определить расход тепла по каждому локальному потребителю, входящему в объединенную систему потребителей тепла.

# Транспортная энергетика

Поскольку невозможно выделить потери, то их доля должна быть автоматически учтена при определении величины тепловой энергии, затраченной выделенным участком.

Формула (1), в случае учета тепловой энергии запишется в виде:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{yy} + Q_o,$$

а выражение (2) –

$$Q_{\text{опл}_j} = Q_{yyi} + \frac{Q_o}{N} P_j. \quad (3)$$

Здесь  $Q_{\text{вх}}$  – количество тепла, использованное всем предприятием, согласно показанию общего теплосчетчика;

$Q_{yy} = \sum_{j=1}^n Q_{yyi}$  – количество тепла, затраченное всеми выделенными участками, с учетом потерь;

$Q_o = \sum_{j=1}^k Q_{oj}$  – количество тепла, затраченное на нужды структурного подразделения, с учетом потерь;

$k$  – количество цеховых контроллеров;

$Q_{\text{опл}_j}$  – количество тепла, подлежащее оплате  $j$ -м выделенным участком.

Выделенным участкам предъявляется документация за израсходованную тепловую энергию на основании расчета по уравнению (3).

При установке АСКУЭ предполагается выполнение ряда требований к ее размещению в выделенном участке для правильного определения тепловой энергии. На всех участках должны быть однотипно установлены ДТ для определения температуры на поверхности отопительных приборов и температуры воздуха в каждом отапливаемом помещении. Датчики, измеряющие температуру на поверхности батареи, устанавливаются, например, на первой секции отопительного прибора в месте входа теплоносителя. Датчики, измеряющие температуру воздуха, устанавливаются на той же стене, где укреплена батарея, например, на высоте 0,1м от уровня пола и 0,1м от ребра батареи, на которой установлен датчик, измеряющий температуру отопительного прибора. Эти требования должны соблюдаться при установке датчиков во всех местах, где установлены приборы отопления. Можно использовать и другие места установки датчиков температуры (не слишком отличающиеся от предложенных). Важна однотипность установки датчиков во всех отапливаемых помещениях.

Установка системы подразумевает несколько этапов.

1. Обследование предприятия. Объект разбивается на участки, в которых необходимо вести учет ресурсов. Определяется количество, виды и марки первичных приборов учета, устанавливаемых как на территориально выделенных участках, так и на уровне предприятия. Фиксируются места установки контроллеров и ЭВМ верхнего уровня. Рассчитываются параметры кабельной системы, количество РИ, ДТ и УУ. На основании проделанной работы определяется окончательная стоимость установки системы.

2. Подготовительный этап. Согласно проектной документации закупаются необходимые материалы и изготавливаются элементы системы. Проводятся работы по переделке силовой, водопроводной и других сетей, предназначенных для установки первичных приборов учета. Осуществляется прокладка кабельной сети, установка первичных приборов учета и элементов системы.

3. Запуск системы. На территориально выделенных участках производится поэтапное подключение первичных приборов учета к элементам системы и запуск их в работу. Осуществляется отладка системы в целом и сдача ее заказчику. Проводится обучение персонала навыкам работы с системой.

Применение системы позволяет:

- а) вести учет за использованием энергоресурсов всеми подразделениями предприятия;
- б) определять долю удельных затрат энергоресурсов в стоимости выпускаемой продукции;
- в) выявлять участки с повышенным расходом энергоносителей;
- г) сократить общий расход энергоресурсов за счет их экономии структурными подразделениями предприятия.

Благодаря применению технологии MicroLAN удалось построить систему без использования микропроцессорных приборов, что приводит к резкому снижению стоимости компонентов системы и системы в целом. Система позволяет измерять количество тепловой энергии в локальных объектах без применения дорогостоящих теплосчетчиков, характеризуется невысокой стоимостью изготовления и настройки ее элементов. Экономию затрат предполагает и простота технического обслуживания.

По данной системе имеются положительные решения Госэнергонадзора РФ, Госстроя РФ, РЭК по Омской области и других организаций.

---

1. Пат. 2138029 Российская Федерация, МПК 6 G 01 K 17/08. Способ определения расхода тепла локальными потребителями, входящими в объединенную систему потребителей тепла [Текст]/ Казачков В. С.; заявитель и патентообладатель Казачков Владимир Семенович. – № 98110982/28; заявл. 09.06.1998, опубл. 20.09.1999, Бюл. № 26.– 4с.: 1 ил.

---

УДК 658.26:656.2:519:673

Д. В. Пашков, А. В. Пономарев

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СРЕДНЕГО РЕМОНТА ЭЛЕКТРОВОЗОВ

*В статье рассматриваются некоторые особенности моделирования электропотребления технологического процесса. В качестве примера взят технологический процесс среднего ремонта электровозов в локомотивных ремонтных депо. Рассмотрен алгоритм построения имитационных моделей, адаптированный к описанию технологических процессов ремонта подвижного состава.*

Железнодорожный транспорт является одним из наиболее энергоемких потребителей, на осуществление деятельности которого ежегодно расходуется около пяти процентов вырабатываемой в стране электрической энергии. Согласно «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г.» [1] одним из главных общетранспортных ориентиров является повышение производительности и рентабельности транспортных систем. Выявление случаев нерационального использования электрической энергии открывает широкие возможности по повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

Одним из важнейших условий обеспечения эффективного использования электрической энергии является соблюдение удельных норм ее расхода на выпуск единицы продукции, которыми в настоящее время большинство структурных подразделений железнодорожного транспорта не располагают. Имеющиеся удельные нормы получены на основании фактических данных об электропотреблении и не позволяют достоверно учесть планируемые изменения в организации производства.

# Транспортная энергетика

Действующая на сети железных дорог «Методика анализа и планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды в ОАО «РЖД» использует данные об электропотреблении за прошедший период и принят на переходный период, к концу которого должны быть разработаны методы получения обоснованных удельных норм ее расхода на выпуск единицы продукции на основе характеристик и режимов работы потребителей электрической энергии. Аналогичная ситуация сложилась и с нормированием расхода электрической энергии на технологические процессы (ТП) ремонта подвижного состава.

Важнейшей задачей текущего периода является создание метода, позволяющего априорно определять расход электрической энергии на ТП ремонта подвижного состава; выполнять оценку эффективности внедрения новых технологий; выявлять участки ТП с повышенными потерями электрической энергии; определять эффективность управляющих воздействий по снижению энергоемкости основных ТП; проводить оценку эффективности мероприятий по получению графика нагрузки, приближенного к равномерному, как по структурным подразделениям, так и по конкретным ТП.

Решить поставленные задачи можно с помощью метода априорной оценки расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава, в основе которого лежит использование дискретно-событийного имитационного моделирования. Подробно этот метод рассмотрен в работе [2]. Данный метод позволяет априорно определять предельно допустимое потребление и получать удельные нормы расхода электрической энергии на выпуск единицы продукции в рамках существующей организации производства.

В основе метода лежит определение расхода электрической энергии на основании статистических экспериментов с имитационной моделью рассматриваемого ТП ремонта подвижного состава. При моделировании крупных технологических процессов ремонта подвижного состава можно выделить некоторые особенности моделирования процесса электропотребления.

Общий подход и последовательность действий, которые надо предпринять для создания модели, описываются алгоритмом, графическая схема которого изображена на рисунке 1.

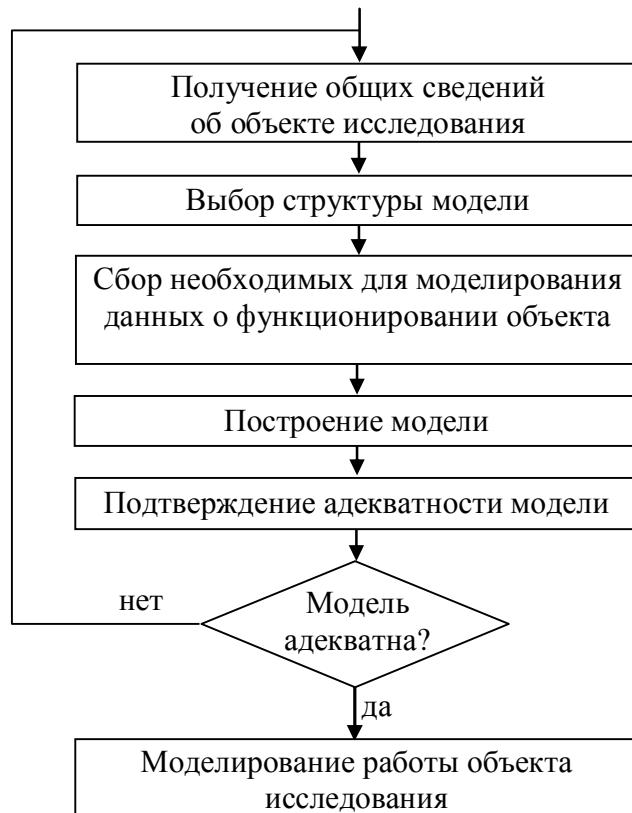


Рисунок 1 – Общий алгоритм построения имитационных моделей

# Транспортная энергетика

С учетом специфики моделируемого объекта существующий алгоритм построения имитационных моделей можно адаптировать к описанию ТП ремонта подвижного состава.

Выбор структуры модели предполагает определение состава динамических и статических объектов; определение связей, обеспечивающих взаимодействие рассмотренных объектов; построение на основе полученных данных структурно-алгоритмической модели.

Этот алгоритм является общим для построения имитационных моделей любых объектов. Дальнейшая детализация пунктов не производится, так как она уникальна для каждой конкретной задачи. Однако конкретизация объекта исследования и целей, для достижения которых решено использовать имитационное моделирование, позволяет адаптировать данный алгоритм под поставленные задачи. В частности, при моделировании ТП ремонта подвижного состава для получения адекватного описания процесса электропотребления данный алгоритм может быть модифицирован следующим образом.

Блоки «получение общих сведений об объекте исследования» и «выбор структуры модели» предполагают выполнение следующих действий:

- составление перечня технологических операций;
- формирование карты обслуживаемых единиц;
- описание внутренних структурных, логических и транспортных связей;
- построение структурно-алгоритмической модели.

Исходными данными в этом случае являются выбранный уровень агрегатного описания, поставленная задача моделирования и описание ТП (технологическая карта с указанием местных особенностей). Для формирования карты обслуживаемых единиц могут быть использованы журналы выполненных работ и другая отчетная информация, на основе которой впоследствии определяются характеристики технологических операций.

Необходимыми для моделирования данными являются характеристики технологических операций, позволяющие описать процесс электропотребления на каждой из них (например, продолжительность и вероятность выполнения технологической операции, режимы работы используемого электрооборудования) или учесть результат их выполнения, если он оказывает влияние на выполнение других технологических операций (например, результат дефектоскопии, внешнего осмотра).

В существующей методологии имитационного моделирования нет определенного, фиксированного подхода к подтверждению адекватности. Наибольшее распространение имеет проверка выборок откликов модели и исследуемой системы на равенство генеральных средних и дисперсий.

При моделировании ТП ремонта подвижного состава предложено использовать трехуровневую проверку адекватности модели.

Первый уровень – это проверка структурно-алгоритмической модели на корректность отображения ТП ремонта подвижного состава. Эта проверка осуществляется экспертной оценкой соответствующих специалистов: технологов и мастеров соответствующих цехов.

Вторым уровнем проверки является оценка разработчиком корректности построенной модели. На этом этапе проверяется отсутствие ошибок в работе модели и правильно ли она отображает позиции структурно-алгоритмической модели.

Третий уровень – подтверждение адекватности на основании выбранного критерия. Это подтверждение должно проводиться на основании проверки репрезентативных выборок откликов модели и исследуемой системы на однородность, что позволяет сделать непараметрический критерий однородности типа  $\omega^2$  Лемана-Розенблatta.

# Транспортная энергетика

Наличие ошибок, выявленных на первом уровне проверки адекватности, требует повторного исследования ТП и корректировки структурно-алгоритмической модели. Ошибки, выявленные на втором уровне, устраняются путем отладки работы модели самим разработчиком. Если модель не проходит третий уровень проверки адекватности (подтверждение), то целесообразным является переход к повторной проверке первого уровня с целью выявления причин расхождения фактических и полученных от модели данных и осуществления возможной корректировки структурно-алгоритмической модели.

Адаптированный к описанию ТП ремонта подвижного состава алгоритм построения имитационных моделей изображен на рисунке 2.

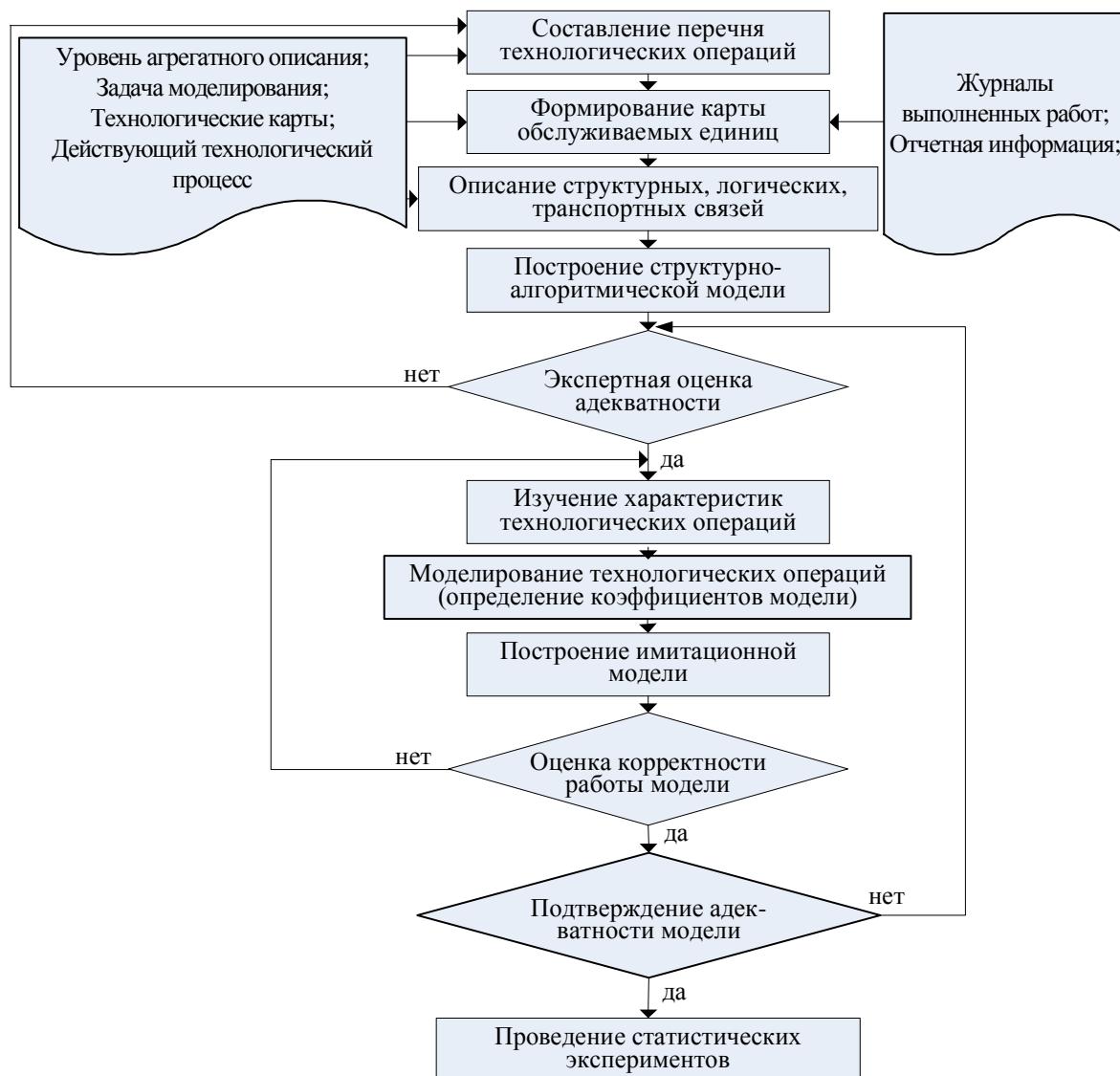


Рисунок 2 – Алгоритм построения имитационной модели, адаптированный к описанию ТП ремонта подвижного состава

Рассмотрим некоторые особенности применения данного алгоритма для моделирования электропотребления ТП ремонта подвижного состава. В качестве объекта моделирования возьмем ТП среднего ремонта электровозов, осуществляемый в условиях локомотивного ремонтного депо.

# Транспортная энергетика

Средний ремонт электровозов предполагает восстановление эксплуатационных характеристик, полное или частичное восстановление ресурса основных узлов и агрегатов, замену и ремонт изношенных, неисправных деталей, узлов и агрегатов локомотивов, частичную замену трубопроводов, кабелей, проводов и оборудования с выработанным ресурсом [3].

При построении любой имитационной модели важно правильно выбрать уровень детализации описания исходя из поставленных перед исследователем задач. Технологический процесс среднего ремонта электровозов имеет сложную структуру и включает в себя множество технологических операций. Однако моделирование всех технологических операций не является целесообразным.

Поставленная задача моделирования электроэнергетической составляющей технологического процесса позволяет перейти к укрупненным технологическим операциям, поскольку большая часть проводимых работ не требуют затрат электроэнергии, а результат их выполнения практически не влияет на расход электроэнергии на других позициях.

Пример укрупненной структурно-алгоритмической модели для ТП среднего ремонта электровозов приведен на рисунке 3, где приняты следующие обозначения:

заштрихованные кружки в левой части модели: позиции разборки основных узлов, демонтажа и мойки оборудования;

черные кружки в центральной части модели: позиции дефектоскопии, браковки, ремонта, замены, испытания оборудования;

белые кружки в правой части модели: позиции монтажа оборудования и сборки основных узлов, регулировка и финальные испытания работы основных узлов.

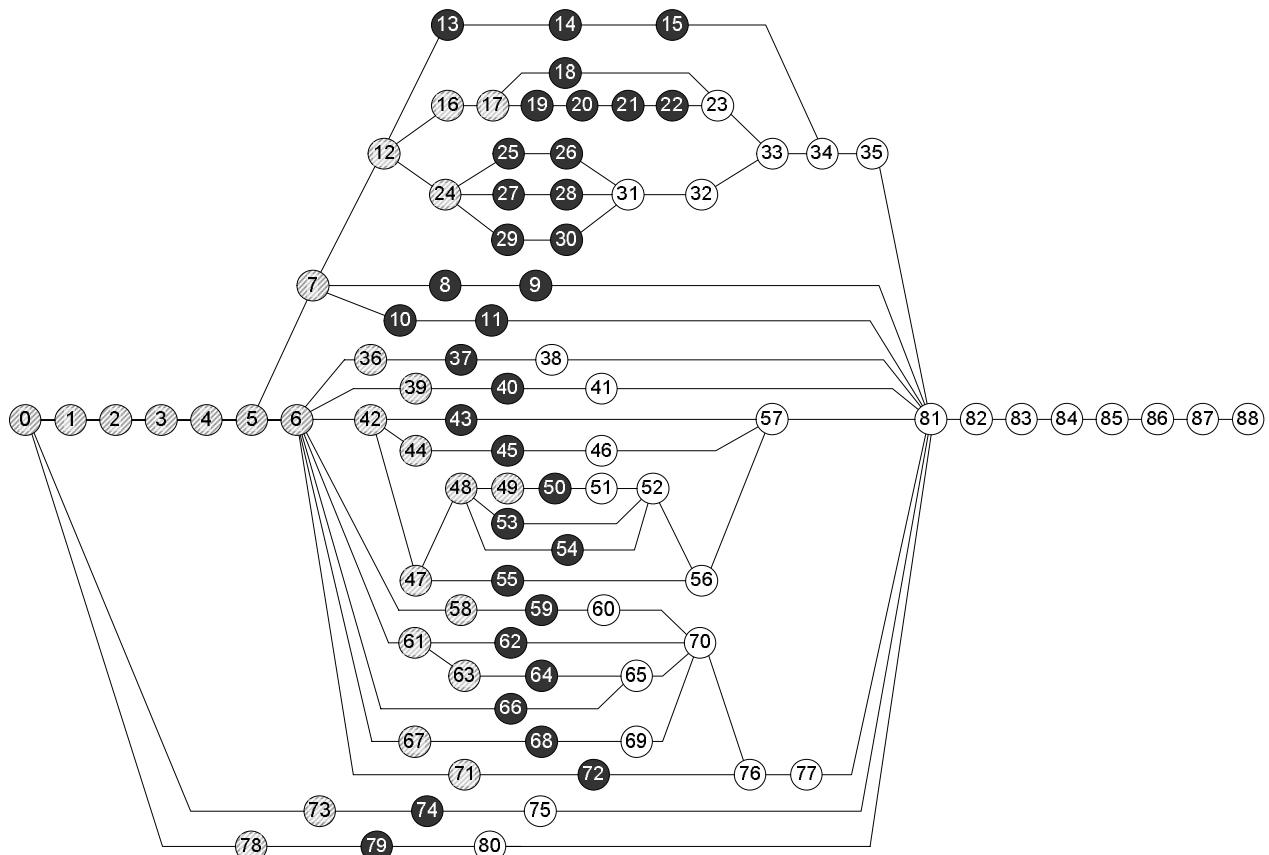


Рисунок 3 – Структурно-алгоритмическая модель ТП среднего ремонта электровозов

Данной структурно-алгоритмической модели соответствует пооперационный перечень укрупненных работ, представленный в таблице.

# Транспортная энергетика

Перечень укрупненных технологических операций среднего ремонта электровоза ВЛ10

Номер технологической операции	Наименование работ	Цех
0	Заезд в депо	«Среднего ремонта»
1	Подготовка электровоза к подъему кузова	«Среднего ремонта»
2	Выкатка секции	«Среднего ремонта»
3	Отсоединение тележек	«Среднего ремонта»
4	Подъем секции	«Среднего ремонта»
5	Выкатка тележек	«Среднего ремонта»
6	Опускание секции	«Среднего ремонта»
...	...	...
88	Выезд электровоза	БПР

На основе полученной структурно-алгоритмической модели выполняется построение имитационной модели в терминах выбранного языка имитационного моделирования. Причем в зависимости от сложности укрупненной технологической операции следует выбирать и уровень детализации ее описания. Для некоторых позиций описание может представлять собой отдельную большую программу, а некоторые позиции могут быть описаны одним блоком (например, технологическая операция «подъем секции», которая предусматривает работу домкратов в течение фиксированного промежутка времени).

Применение многократного запуска имитационной модели с входными параметрами, отражающими местные условия работы, и последующей статистической обработки выборки откликов позволяет получать интервальные оценки норм расхода электрической энергии. Такой подход отражает реальный ТП, учитывающий различные штатные отклонения в процессе электропотребления. Например, к таким отклонениям можно отнести повышенный процент установления дефектов изделий и, как следствие, повышение уровня электропотребления на позициях устранения дефектов. Существенным плюсом предлагаемого метода является также возможность нормирования расхода электроэнергии на ремонт различных серий электровозов, за счет изменения структурно-алгоритмической модели ТП и номенклатуры производимых работ.

## Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации № 1734-р от 22.11.2008 г.
2. Пономарев, А. В. Метод априорной оценки расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава [Текст] / А. В. Пономарев // Известия Транссиба. Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 1(1). – С. 66 – 73.
3. Находкин, В. М. Технология ремонта ТПС [Текст] / В. М. Находкин. – М.: Транспорт, 1998. – 461 с.

---

УДК 621.316

С. Ю. Ушаков, В. И. Гутников, А. Н. Ларин

## ПРОБЛЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТОВЕРНОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В «ГОРЯЧЕМ» ПРОСТОЕ ЛОКОМОТИВОВ ПРИ ДЕПО И ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ПРИЧАСТНЫМ БИЗНЕС-ЕДИНИЦАМ

*В статье представлены экспериментальные исследования расхода электрической энергии на электровозах в «горячем» простое при депо и способ разделения его по причастным бизнес-единицам.*

По оценочным данным Центрального управления планирования и нормирования материально-технических ресурсов ОАО «РЖД» объем расхода электроэнергии по электроподвижному составу в «горячем» простое при депо составляет до 7 % от общего расхода электроэнергии на тягу поездов, поэтому сокращение доли «горячего» простоя может существенно снизить затраты электроэнергии на тягу поездов.

Однако в связи с реформированием ОАО «РЖД» возникла ситуация, когда не все образованные бизнес-единицы, причастные к непроизводительному расходу электроэнергии на «горячий» простой локомотивов, заинтересованы в снижении его доли. Так, несмотря на то, что на долю «горячего» простоя напрямую влияют территориальные и структурные подразделения Дирекции по ремонту тягового подвижного состава (ЦТР) и Дирекции тяги (ЦТ), весь расход электрической энергии в «горячем» простое относится на последнюю, в то время как в тепловозной тяге существует распределение расхода дизельного топлива между данными бизнес-единицами. Сложившаяся ситуация не способствует снижению доли «горячего» простоя электроподвижного состава при депо, а также повышению рациональности эксплуатации локомотивов. Продолжительность «горячего» простоя электровозов при депо в ожидании ремонта в среднем составляет 12 – 14 ч, иногда достигая 20 ч.

Кроме того, на низком уровне остается состояние учета электрической энергии при простое электроподвижного состава в «горячем» состоянии при депо. В режиме «горячего» простоя в работе находится только вспомогательное оборудование электровоза [1] (мотор-вентиляторы, мотор-компрессоры, отопительные приборы, фазорасщепители и др.). Номинальная мощность всех вспомогательных машин электровозов постоянного тока превышает номинальную мощность локомотивов на 2 %. На электровозах переменного тока эта цифра составляет 2,5 – 4,5 %. Однако реальная мощность вспомогательного оборудования, реализуемая в режиме «горячего» простоя, оказывается существенно меньше суммарных паспортных значений. Как показывают результаты исследований, проведенных в ремонтных локомотивных депо Западно-Сибирской железной дороги Москва, Барабинск и Карасук, время работы мотор-компрессоров обычно составляет 2 – 3 % от всего времени простоя, мотор-вентиляторы работают, как правило, при пониженном напряжении, что соответствует половине их номинальной мощности, а обогрев кабин осуществляется в основном половиной обогревательных элементов. Таким образом, суммарная мощность, потребляемая вспомогательным оборудованием во время «горячего» простоя, составляет несколько десятков киловатт. Экспериментальные часовые значения электропотребления вспомогательным оборудованием электровозов приведены в таблице 1. Причем энергия, потребляемая мотор-компрессорами, рассчитана исходя из среднего фактического времени его работы в течение одного часа простоя.

Порог чувствительности каждого типа счетчиков приведен в соответствующих паспортах. Для электромеханических счетчиков постоянного тока типа СКВТ-Д600М и СКВТ-Д621 приведен порог чувствительности по току, который составляет 2 % от номинального значения. Для электровозов постоянного ВЛ10, ВЛ11, ЧС2, ЧС4 номинальный ток составляет 1500 А, что при номинальном напряжении в сети 3 кВ соответствует мощности 90 кВт. Для электровозов ВЛ10 и ВЛ11, прошедших капитальный ремонт, устанавливают счетчики в каждой секции, поэтому фактическая мощность вспомогательного оборудования на каждый счетчик уменьшается в два раза.

Разработанный заводом «ЛЭМ» электронный счетчик постоянного тока типа СКВТ-Ф610 имеет порог чувствительности 1 % от номинального тока, но ими оборудовано незначительное количество электровозов. Установленные на электровозах ВЛ10 и ВЛ11 системы РПДА-Г нормально работают только при установке именного картриджа машиниста. В режиме «горячего» простоя при отсутствии картриджа у системы РПДА-Г цена одного деления составляет 100 кВт·ч, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым системам коммерческого учета.

# Транспортная энергетика

Таблица 1 – Экспериментальные часовые значения электропотребления вспомогательным оборудованием электровозов по сериям

Серия электровоза	Часовые значения электропотребления вспомогательным оборудованием электровозов, кВт·ч				Общее часовое электропотребление, кВт·ч
	мотор-вентиляторы обдува двигателей и очистки воздуха	мотор-компрессоры	печи (калориферы)	вспомогательное оборудование питания	
ВЛ10	39,5	1,5	5	–	46,0
ВЛ11	39,5	1,5	5	–	46,0
ЧС2	48	0,8	2,7	–	51,5
ВЛ80с	80	3,5	2	60	145,5
ЭП1	55	0,4	4	6,5	65,9
ЭП2К	45	0,5	4	–	49,5
ЭП10	–	–	–	–	72,0

На электровозах переменного тока основных серий ВЛ80, ВЛ80т, ВЛ80с порог чувствительности штатных счетчиков составляет 2 % от номинальной активной мощности электровоза, что при коэффициенте трансформации тока  $k_{tt}$ , равном 60, и номинальном питающем напряжении 25 кВ составляет 150 кВт.

Следовательно, порог чувствительности штатных приборов учета электрической энергии, установленных на ЭПС как переменного, так и постоянного тока, часто превышает фактическую суммарную мощность установленного вспомогательного оборудования, что приводит к существенному недоучету электрической энергии, который по результатам экспериментальных исследований для разных серий электровозов может составлять от 30 до 80 %.

Порог чувствительности штатных приборов учета на ЭПС и суммарная фактическая мощность вспомогательного оборудования при неработающих и работающих мотор-компрессорах приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика основных штатных приборов учета электрической энергии и суммарная мощность вспомогательного оборудования

Серия локомотива	Штатные приборы учета электрической энергии			Суммарная экспериментальная мощность вспомогательного оборудования	
	тип счетчика	класс точности	порог чувств. по мощности, кВт	с мотор-компрессорами	без мотор-компрессоров
ВЛ10	СКВТ Д600М	3,0	90	103	74,4
	СКВТ Д621	2,5			
ВЛ10к*	СКВТ Д600М	3,0	90	51,5	37,2
ВЛ11*	СКВТ Д621	2,5	90	92,8	58,8
ЧС2	СКВТ Д621	2,5	90		
ВЛ80с*	Ф440	2,0		155	115
	Ф442	2,0	150		
ВЛ80т*	Ф440	2,0	150	155	115
	Ф442	2,0			
ВЛ80р*	Ф440	2,0	150	155	115
	Ф442	2,0			
ЭП1	Альфа	1,0	75	86	64
ЭП2К	СКВТ Д621	2,5	90	78	53

\* Счетчики электроэнергии установлены в каждой секции.

Сравнивая пороговые значения чувствительности штатных счетчиков и мощности вспомогательного оборудования, можно сделать вывод о том, что только при работе мотор-компрессоров мощность вспомогательного оборудования (и то не всегда) превышает порог чувствительности. Учитывая, что порог чувствительности по мощности штатных приборов учета электрической энергии (особенно электромеханических типа СКВТ-Д600М и СКВТ-Д621) имеет разброс в пределах 1,5 – 3 % от номинальных значений, погрешность учета электрической энергии в «горячем» простое также изменяется в широких пределах (30 – 80 % от номинальных значений).

Достоверность учета электропотребления электровозов в «горячем» простое можно обеспечить наличием приборов учета на фидерах контактной сети, питающих тractionные пути локомотивного депо. Однако следует отметить, что данные фидеры тяговых подстанций далеко не всегда оборудованы приборами учета электроэнергии, а если и оборудованы, то учет по ним, как правило, не ведется.

Существенный недоучет расхода электрической энергии в «горячем» состоянии по счетчикам локомотивов является одной из причин высокого уровня небаланса электрической энергии на тягу поездов в осенние, зимние и весенние месяцы.

Учитывая сказанное выше, можно выделить два основных направления по снижению доли непроизводительного расхода электрической энергии в «горячем» простое при депо:

повышение заинтересованности в снижении доли «горячего» простоя причастных к перевозочному процессу бизнес-единиц (ЦТР и ЦТ) за счет разработки порядка распределения между ними расхода электроэнергии по электроподвижному составу в «горячем» простое;

повышение достоверности учета расхода электрической энергии электровозами в «горячем» простое при депо.

В настоящее время расход электроэнергии на «горячий» простой определяется в соответствии с маршрутными листами машинистов по разнице показаний счетчиков электрической энергии, фиксируемых локомотивными бригадами при сдаче электровоза в ремонт и при его приеме из ремонта. При этом от момента сдачи электровоза в ремонт до его приема из ремонта можно выделить четыре временных отрезка:

ожидание ремонта – отрезок времени между сдачей локомотива эксплуатационной бригадой в ремонт и приемом локомотива в ремонт;

ремонт – отрезок времени между приемом локомотива в ремонт и сдачей локомотива из ремонта приемочной бригадой;

приемка локомотива – отрезок времени между сдачей локомотива из ремонта приемочной бригадой и окончательной его приемкой;

ожидание работы – отрезок времени между окончательной приемкой локомотива приемочной бригадой и приемом локомотива эксплуатационной бригадой в работу.

Каждый из данных промежутков времени должен относиться на ту или иную бизнес-единицу. Так, «горячий» простой в ожидании ремонта и в ходе приемки локомотива должен полностью относиться на Дирекцию по ремонту тягового подвижного состава, а «горячий» простой в ожидании работы – на Дирекцию тяги. При этом стоит учитывать тот момент, что рабочая смена в ремонтном локомотивном депо длится с 8:00 до 20:00, поэтому в случае если локомотив был сдан эксплуатационной бригадой в ремонт до 8:00 местного времени, часть расхода электрической энергии на «горячий» простой до 8:00 должна быть отнесена на ЦТ, а начиная с 8:00 – на ЦТР. Такой подход будет стимулировать ремонтные депо в снижении времени ожидания ремонта.

В случае внепланового ремонта локомотива все время ожидания ремонта относится на ЦТР. Для контроля электропотребления в «горячем» простое в ремонтных локомотивных депо предлагается ввести специальную форму отчетности (таблица 3), а ответственным за ее заполнение назначить дежурного по депо.

# Транспортная энергетика

Таблица 3 – Типовая форма контроля времени нахождения электроподвижного состава при депо в «горячем» простое в ожидании ремонта и вождении работы

Состав вспомогательного оборудования, находящегося в работе (да/нет) **	Сдана локомотива эксплуатационной бригадой в ремонт	Прием локомотива в ремонт	Сдача локомотива из ремонта	Окончательная приемка локомотива приемочной бригадой	Прием локомотива эксплуатационной бригадой

\* – только для приборов учета, отвечающих требованиям, предъявляемым к системам коммерческого учета электроэнергии;

\*\* – только если в графе 5 стоит прочерк, т. е. на электровозе отсутствуют приборы учета электроэнергии, отвечающие требованиям, предъявляемым к системам коммерческого учета;

\*\*\* – только если электровоз сдан эксплуатационной бригадой в плановый ремонт в период с 20:00 до 8:00.

В графе 4 (см. таблицу 3) отмечается тип ремонта: плановый или внеплановый, а в графах 12 – 22 фиксируются показания счетчиков и моменты перехода локомотива из одного состояния в другое. При этом расход электрической энергии по показаниям счетчиков может определяться лишь для приборов, отвечающих требованиям, предъявляемым к системам коммерческого учета. В остальных случаях расход электрической энергии в «горячем» простое предлагается определять расчетным способом на основании экспериментальных данных о часовых значениях электропотребления вспомогательным оборудованием электровозов в соответствии с данными таблицы 2. Состав вспомогательного оборудования, находящегося в работе, фиксируется в графах 6 – 11 предлагаемой формы (см. таблицу 3).

Ежемесячные относительные потери электрической энергии в тяговой сети при наличии приборов учета электрической энергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций, питающих тractionные пути, должны определяться в соответствии с показаниями данных приборов по формуле:

$$\delta_{\text{мес}} = \frac{W_{\text{мес}}^{\text{TP}} - W_{\text{мес}}^{\text{ЭПС}}}{W_{\text{мес}}^{\text{TP}}}, \quad 1)$$

где  $W_{\text{мес}}^{\text{TP}}$  – месячный расход электрической энергии на «горячий» простой по счетчику на фидере тяговой подстанции, питающем тractionные пути;

$W_{\text{мес}}^{\text{ЭПС}}$  – месячный расход электрической энергии на «горячий» простой при депо всеми электровозами, определенный по счетчикам ЭПС или расчетным способом.

В случае отсутствия учета электрической энергии на фидере тяговой подстанции, питающем тractionные пути локомотивного депо, потери электрической энергии в тяговой сети определяются расчетным путем на основании данных о длине и удельных активных сопротивлениях контактной сети и питающих линий, а также о среднем токе, потребляемом электровозами.

Расход электрической энергии в «горячем» простое с учетом потерь электрической энергии для каждого отдельного локомотива определится по формуле:

$$W_{\text{г.п}}^{\text{TP}} = \frac{W_{\text{г.п}}^{\text{ЭПС}}}{1 - \delta_{\text{мес}}}, \quad 2)$$

где  $W_{\text{г.п}}^{\text{ЭПС}}$  – расход электрической энергии на «горячий» простой одного электровоза, определенный по показаниям счетчиков ЭПС или расчетным способом.

Достоверный учет расхода электрической энергии в «горячем» простое позволит снизить небаланс электрической энергии на тягу поездов, а разделение расхода электрической энергии между причастными бизнес-единицами позволит сократить долю «горячего» простоя и, как следствие, сократить непроизводительный расход электрической энергии.

---

1. Айзенбуд, С. Я. Эксплуатация локомотивов [Текст] / С. Я. Айзенбуд, П. И. Кельперис. – М.: Транспорт, 1990. – 261 с

С. А. Лунев, Д. В. Борисенко, Р. Ш. Аюпов

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ  
ТРАНСПОРТЕ**

*В статье рассмотрены теоретические направления, перспективные с точки зрения автоматизации управления технологическими процессами и проектирования технологических комплексов на железнодорожном транспорте.*

Общими требованиями для технологических процессов предприятий железнодорожного транспорта являются непрерывность, безопасность, контролируемость. Обеспечить выполнение этих требований часто оказывается трудной задачей в силу объективных причин, обусловленных природными явлениями, технологическими процессами предприятий других отраслей, социальными явлениями. Очевидно, что решение подобной задачи требует поиска не только новых перспективных методов, применяемых при управлении технологическими процессами, но и новых методов проектирования технологических комплексов, создаваемых на железнодорожном транспорте.

Как правило, при управлении технологическими процессами на железнодорожном транспорте требуется анализ показаний большого числа датчиков различной природы, а при проектировании – учет не меньшей совокупности разнородных факторов. Несмотря на проводимый в последнее десятилетие курс на информатизацию и автоматизацию железнодорожной отрасли, задача автоматизированного анализа состояния технологических процессов и принятия решений в подавляющем большинстве случаев не решена.

Задачи автоматизации управления технологическими процессами и проектирования технологических комплексов на железнодорожном транспорте, по мнению авторов, могут быть решены с применением следующих перспективных теоретических направлений.

1. Графовые изображения, предназначенные, как правило, для визуализации информационных моделей, обладающих семантикой и иерархической структурой. Существуют различные методы генерации статических графов, которые применимы к задачам автоматизации построения надежных и безопасных систем инфраструктуры железных дорог, непосредственно определяющих бесперебойную работу транспортного конвейера.

2. Аппарат конформных отображений, базирующийся на простейших функциях с весьма простыми и наглядными законами и имеющий существенные преимущества по сравнению с эквивалентным классическим матричным аппаратом. Это позволяет оперативно реагировать на аварийную или предотказную ситуацию, особенно при больших объемах вычислений, в системах контроля и управления.

3. Теория нечетких множеств, нечеткая логика и нейронные сети, получившие мировое признание, как инструмент для решения сложных, плохо формализуемых задач, в том числе и при построении различных систем управления. Принятие решений на основании анализа большого объема разнородной информации, классификация, распознавание образов, фильтрация – задачи, с успехом решаемые с помощью данного теоретического аппарата, относящегося к области искусственного интеллекта [1]. Однако до настоящего времени эти методы практически не применяются на железнодорожном транспорте, где с их помощью можно не только повысить безопасность движения поездов, но и улучшить экономические показатели.

В настоящее время авторами исследуются возможности применения указанных теоретических направлений в следующих областях.

1. Повышение эффективности системы пропуска обратного тягового тока в электротехническом комплексе электроснабжения железных дорог достигается за счет рационального выбора места установки и количества междупутных и междурельсовых перемычек, а также

за счет автоматизации рутинных проектных операций и сокращения доли ручного труда при внесении изменений в схемы канализации обратного тягового тока (КОТТ) в случае капитального ремонта или реконструкции [2].

Вместе с тем обеспечение выполнения нормативных требований при построении систем пропуска обратного тягового тока является актуальной, направленной на повышение безопасности движения поездов, и трудоемкой, особенно в период проведения реконструкции путевого развития тяговых рельсовых сетей, задачей. Как показывает опыт, во многих случаях данные системы содержат ошибки, допущенные при их синтезе. В связи с этим возникает необходимость автоматизировать этап разработки и построения данных систем. В качестве решения предлагается формализовать данный процесс на основе применения теории графов, путем синтеза по системе пропуска обратного тягового тока соответствующего ей графа, который затем анализируется на предмет соответствия нормативным документам:

количество двухниточных рельсовых цепей (РЦ) в простом контуре (при отсутствии параллельных ветвей для протекания тягового тока) или в эквивалентном контуре (при наличии таких ветвей) должно быть не менее 10 при частоте сигнального тока 25 Гц или не менее шести при частоте сигнального тока 50 Гц. При этом в расчете учитываются только двухниточные РЦ;

для тональных РЦ длина обходной цепи для сигнального тока по замкнутому контуру (простому или эквивалентному) должна быть не менее четырехкратной длины самой длинной рельсовой цепи, входящей в этот контур.

Проверку указанных требований следует выполнять для всех элементарных ветвей (не имеющих параллельных ответвлений), входящих в сложный разветвленный контур.

Авторами разработаны универсальные алгоритмы анализа схем КОТТ при рассмотрении трех или более параллельных между собой ветвей.

На основании изложенного выше создана автоматизированная система анализа схем КОТТ (АСКОТТ), имеющая свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Эта программа и метод расчета прошли апробацию на Западно-Сибирской, Красноярской и Забайкальской железных дорогах. Данный программный продукт может использоваться для упрощения работы со схемами КОТТ в период развития и реконструкции железнодорожного транспорта [3].

2. Анализ исправности, безопасности функционирования, а также распространения сигнала по рельсовым линиям в условиях функционального влияния множества факторов, изменяющихся с течением времени, предполагает разработку эффективного диагностического комплекса на основе современной микропроцессорной элементной базы с применением специализированного, быстрого и точного математического аппарата [4]. В качестве такого математического аппарата для непрерывного контроля состояния тяговой рельсовой сети авторами предлагается использование аппарата конформных отображений.

Рельсовая сеть, состоящая из отдельных рельсовых линий, выполняет функции по обеспечению безопасности движения и непрерывному пропуску обратного тягового тока, при этом функционируя в достаточно жестких и динамично изменяющихся условиях (зависимость от сопротивления изоляции, сопротивления рельсов, поездной ситуации, температурных условий и т. д.).

Основным преимуществом математического аппарата конформных отображений для непрерывного контроля технического состояния рельсовой линии является его универсальность к виду рельсового четырехполюсника (РЧП), а также наглядное номографическое представление изменения состояния в конкретный момент времени. В качестве критерия дискретности измерения рассматривается единичный, настраиваемый пользователем интервал времени для осуществления поиска постепенных отказов. Естественно, что с увеличением интервала времени нагрузка на вычислительные ресурсы программно-аппаратного комплекса уменьшается, но также уменьшается и вероятность фиксации внезапного отказа в любой момент времени. Очевидно что предлагаемый комплекс должен представлять собой сис-

# Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

тему реального времени как со стороны аппаратной части, так и со стороны реализации программного обеспечения. Для осуществления непрерывного контроля технического состояния каждой отдельной рельсовой линии необходимо иметь, как минимум, три информационных буфера: один для обслуживания процесса поиска постепенных отказов и два, с учетом особенностей обработки информации в системах реального времени, для обслуживания процесса поиска внезапных отказов.

Отображение множества выходных параметров РЧП Z на множество входных W выполняется с использованием дробно-линейного преобразования [5]:

$$W = \frac{A \cdot Z + B}{C \cdot Z + D}, \quad (1)$$

где A, B, C, D – коэффициенты рельсового четырехполюсника.

Для пассивного четырехполюсника, каковым является рельсовая линия, имеем:  $A \cdot D - B \cdot C = 1$ .

Необходимо отметить, что станционная обратная тяговая сеть представляет собой достаточно сложную, разветвленную структуру, но имеет явное преимущество перед перегонной обратной тяговой сетью – точки измерения входных параметров (напряжение и ток на выходе источника питания и напряжение на входе путевого приемника) сосредоточены на посту электрической централизации, что облегчает снятие диагностической информации. Для перегонных сетей, с этой точки зрения, удобны системы с централизованным размещением аппаратуры. Тем не менее существует возможность доставки информации с перегона для классических систем с применением высокоскоростных модемов, выполненных по технологии SHDSL [6].

Важной особенностью разработанного диагностического комплекса является учет всех факторов влияния на техническое состояние рельсовой сети, большинство из которых имеют вероятностный характер. Воздействие всех видов помех может быть совмещенным во времени, а может проявляться и в разные моменты.

Основными источниками помех в рельсовой линии являются тяговый ток; посторонние блуждающие токи, создаваемые заземленными источниками электрической энергии, к которым относятся цепи питания разъединителей, постов секционирования и пунктов параллельного соединения; заземляющие устройства, соединенные с рельсовыми нитями.

Принципы построения распознающих классификаторов состояния рельсовых линий следующие: микропроцессорный классификатор с помощью обученной решающей функции предварительно разделяет множество образов, характеризующихся совокупностью первичных информативных признаков, на непересекающиеся классы, соответствующие режимам функционирования, а затем в каждый дискретный момент времени достоверно определяет принадлежность предъявляемого образа к конкретному состоянию. И в этой связи определение состояния рельсовой линии в основном связано с решением задач выделения информативных признаков и синтезом правил, на основе которых будет осуществляться разделение множества образов на классы.

На основе сказанного выше авторами разработано общее словесное описание алгоритма функционирования программной части диагностирующего комплекса.

Шаг 1. Получение значений информативных признаков.

Шаг 2. Формирование системы А-параметров исследуемого РЧП.

Шаг 3. Выборка образа номографических решений для исследуемого РЧП из базы номографических образов.

Шаг 4. Проецирование полученного значения выходного сопротивления на основе текущих измерений с использованием аппарата конформных отображений на область общих решений [6].

Шаг 5. Определение положения текущего измерения по отношению к области общих решений.

Шаг 6. Формирование выводов о текущем состоянии исследуемого РЧП.

Диагностический комплекс позволяет производить следующие операции: мониторинг состояния системы пропуска обратного тягового тока в реальном масштабе времени; обработку полученной информации с применением математического аппарата конформных отображений и дробно-линейных преобразований для выявления продольных и поперечных неоднородностей (дефектов); определение текущего состояния рельсовой линии, подготовку рекомендаций по устранению выявленных предотказных ситуаций [4].

3. Большое число железнодорожных потребителей электроэнергии являются потребителями первой категории. Это означает, что для каждого такого потребителя актуальна задача оперативного выбора одного из нескольких имеющихся источников электроэнергии. Сложная, географически распределенная система электроснабжения на железнодорожном транспорте предполагает многообразие протекающих в ней процессов и явлений. Постоянно расширяющийся спектр электротехнического оборудования ответственных потребителей определяет разнообразие требований к качеству электроэнергии в системе электроснабжения. Повысить эффективность оперативного выбора источника электроэнергии можно за счет комплексной оценки ее качества по совокупности наиболее важных для потребителей параметров.

Согласно ГОСТ 23875-88 под качеством электроэнергии следует понимать «степень соответствия параметров электрической энергии их установленным значениям». Такое определение не учитывает возможности специфических требований, предъявляемых электроприемниками к параметрам электроэнергии. В работе [7] под качеством электроэнергии предлагается понимать «...совокупность параметров (свойств), обуславливающих пригодность электроэнергии предлагается удовлетворять определенные потребности электроприемников в соответствии с их назначением». Анализ нормативных документов показывает, что это определение синтезировано на основе терминологии ГОСТ 15467-79. Оба эти определения имеют как положительные стороны, так и недостатки. В официальном определении качества электроэнергии не учитывается возможность специфических требований, предъявляемых электроприемниками к ее параметрам, тогда как определение, данное в работе [5], плохо согласуется с нормами качества электроэнергии, вводимыми отраслевыми и общегосударственными стандартами, такими, например, как ГОСТ 13109-97.

Для удобства формализации и использования этих понятий при построении вычислительных структур авторами предлагается следующее. На основе определений «комплексный показатель качества» из ГОСТ 15467-79 и «качество электроэнергии» из ГОСТ 23875-88 и из работы [5] ввести понятие «комплексный показатель качества электроэнергии». Комплексный показатель качества электроэнергии (КПКЭ) целесообразно определить как функцию нескольких переменных, определенную на декартовом произведении множеств возможных значений параметров, используемых для оценки качества электроэнергии, и принимающую значения на интервале [0,1]. Значение КПКЭ интерпретируется как степень соответствия всех контролируемых параметров установленным значениям, обуславливающая пригодность электроэнергии удовлетворять определенные потребности электроприемников в соответствии с их назначением. Таким образом, оценка качества электроэнергии сводится к вычислению КПКЭ.

Необходимость учета множества разнородных факторов делает задачу вычисления КПКЭ сложной и плохо формализуемой. Для ее решения может быть применен аппарат теории нечетких множеств и теории искусственных нейронных сетей, позволяющий получить алгоритмы вычисления КПКЭ.

Решение данной задачи с помощью теории нечетких множеств заключается в выражении КПКЭ через отдельные параметры электроэнергии путем введения для каждого из них отдельного нечеткого множества.

# Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Показать применение этого метода можно на примере комплексной оценки качества электроэнергии по напряжению, частоте и коэффициенту одиннадцатой гармонической составляющей. Оценка по этим параметрам актуальна, в частности, для потребителей первой категории на железнодорожном транспорте, электрифицированном на постоянном токе.

На множествах возможных значений выбранных параметров и показателей качества электроэнергии необходимо задать по нечеткому множеству, которые позволят формализовать понятия «нормальное напряжение», «нормальная частота», «нормальный коэффициент 11-й гармоники»:

$$A_1 = \{(U, \mu_{A1}(U)); U \in X_1\}; \quad (2)$$

$$A_2 = \{(f, \mu_{A2}(f)); f \in X_2\}; \quad (3)$$

$$A_3 = \{(K_{U11}, \mu_{A3}(K_{U11})); K_{U11} \in X_3\}, \quad (4)$$

где  $U$ ,  $f$  – значения напряжения и частоты;

$K_{U11}$  – значение коэффициента одиннадцатой гармонической составляющей;

$X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  – множества возможных значений соответственно напряжения, частоты и коэффициента одиннадцатой гармонической составляющей;

$\mu_{A1}(U)$  – функция принадлежности значения  $U$  к нечеткому множеству  $A_1$ ;

$\mu_{A2}(f)$  – функция принадлежности значения  $f$  к нечеткому множеству  $A_2$ ;

$\mu_{A3}(K_{U11})$  – функция принадлежности значения  $K_{U11}$  к нечеткому множеству  $A_3$ .

На множестве возможных значений комплексного показателя качества электроэнергии предлагается ввести нечеткое множество, с помощью которого формализовать понятие «качественная электроэнергия»:

$$M = f(U, f, K_{U11}); \quad (5)$$

$$K = \{(M, \mu_K(M)); M \in [0, 1]\}, \quad (6)$$

где  $M$  – комплексный показатель качества электроэнергии.

В качестве нечетких множеств, введенных формулами (1) – (4), могут быть использованы треугольные нечеткие числа и трапециевидные нечеткие интервалы. График функции принадлежности трапециевидного нечеткого интервала, формализующего понятие «нормальное напряжение», приведен на рисунке 1.

Использование указанных нечетких множеств с выпуклыми функциями принадлежности в алгоритме нечеткого вывода Мамдани [1] позволяет получить количественное значение КПКЭ. Алгоритм нечеткого вывода, используемый для вычисления значения КПКЭ, включает в себя следующую последовательность действий: фазификация на основе измеренных значений параметров электроэнергии, агрегирование подусловий правила нечеткой продукции, активизация заключения в правиле нечеткой продукции, дефазификация на основе нечеткого множества, полученного в заключении правила нечеткой продукции.

Согласно второму предлагаемому подходу комплексную оценку качест-

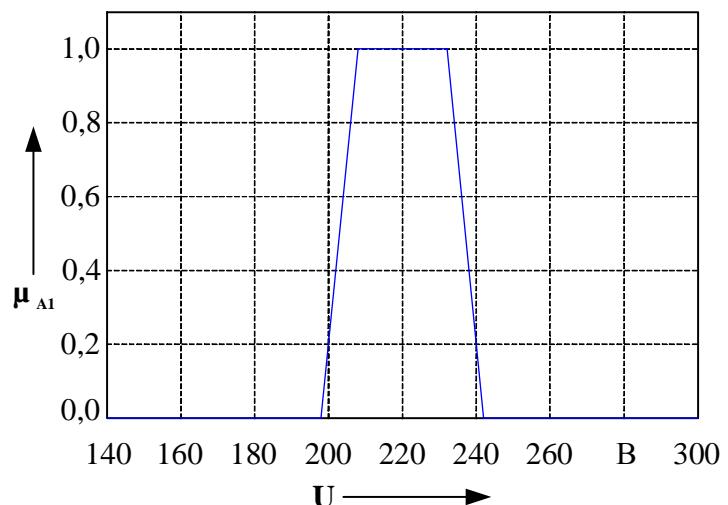


Рисунок 1 – Графики функций принадлежности трапециевидного нечеткого интервала, формализующего понятие «нормальное напряжение»

ва электроэнергии можно осуществить путем аппроксимации экспертных данных, которые могут быть получены различными путями – как непосредственно от экспертов, так и на основе альтернативных методов оценки качества электроэнергии. Одним из видов аппроксимации, применимых в данном случае, является стохастическая аппроксимация путем обучения нейросетевой модели [8]. Обученная на ограниченном количестве данных нейронная сеть способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты на данных, не использовавшихся в процессе обучения [2]. Кроме того, многозвенная структура, позволяющая вести параллельную обработку информации, делает применение искусственных нейронных сетей перспективным подходом при решении задач сложной обработки информации, в том числе и при комплексной оценке качества электроэнергии, особенно с учетом возможностей современной вычислительной техники.

Для комплексной оценки качества электроэнергии на основе нейросетевой модели предлагается использовать нейроны с сигмоидальной функцией активации. Размер нейросетевой модели прямого распространения может быть оценен согласно теореме Колмогорова [7] и уточнен на основе численных экспериментов. В результате проведенных численных экспериментов установлено, что для комплексной оценки качества электроэнергии по напряжению, частоте и коэффициенту одиннадцатой гармонической составляющей достаточно использовать нейросетевую модель прямого распространения со структурой 3-7-1, что означает три входа, семь нейронов скрытого слоя и один нейрон выходного слоя. Каждый нейрон состоит из сумматора взвешенных входных сигналов ( $\Sigma$ ) и элемента, реализующего сигмоидальную функцию активации ( $\Phi$ ), аргументом которой является значение, вычисленное сумматором. Граф рассматриваемой нейросетевой модели представлен на рисунке 2. Для обучения нейросетевой модели с такой структурой наиболее подходящим является алгоритм Левенберга-Марквардта [8].

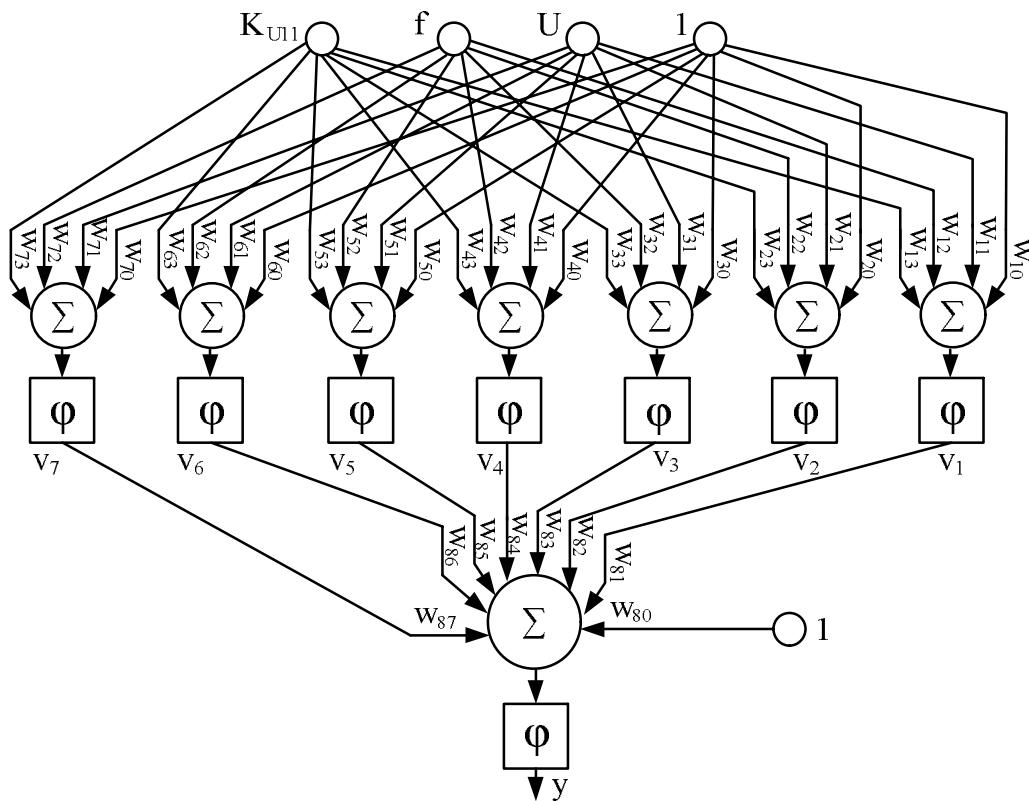


Рисунок 2 – Граф нейросетевой модели, оценивающей качество электроэнергии по напряжению, частоте и коэффициенту одиннадцатой гармонической составляющей

Задача оперативного выбора источника электроэнергии при использовании второго метода комплексной оценки ее качества может быть решена следующим образом. Несколько

идентичных нейронных сетей по числу имеющихся источников оценивают качество предоставляемой ими электроэнергии. Далее результаты оценки сравниваются, что дает возможность осуществить оперативный выбор источника, обеспечивающего в текущий момент более высокое качество электроэнергии. Структурная схема разработанного авторами устройства автоматического переключения источников электропитания [9], реализующего данный принцип, представлена на рисунке 3.

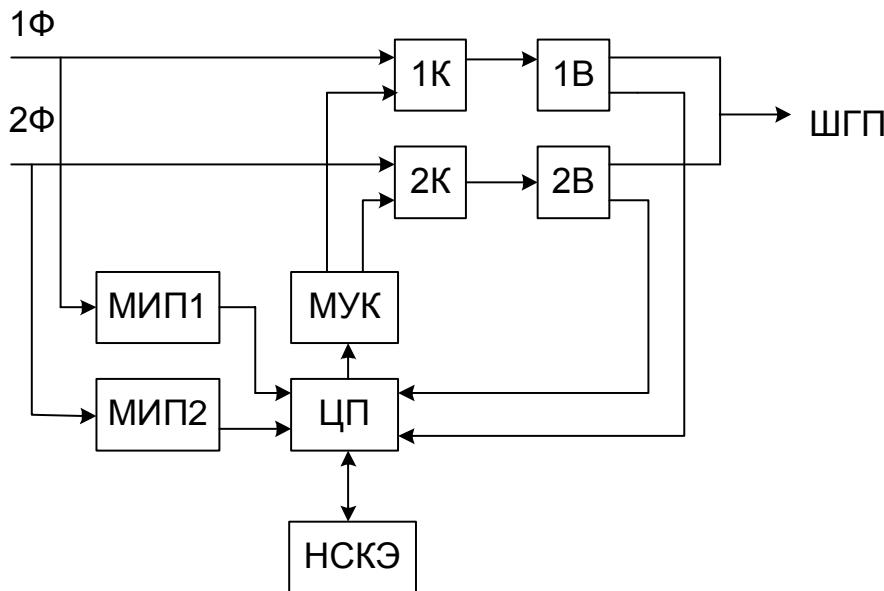


Рисунок 3 – Структурная схема устройства автоматического переключения источников электропитания

Устройство автоматического переключения источников электропитания функционирует следующим образом. Модули измерения параметров электроэнергии МИП1 и МИП2 подключаются к фидерам 1Ф и 2Ф от источников электропитания и выполняют масштабное преобразование сигналов, их оцифровку и обработку, предоставляя центральному процессору (ЦП) параметры электроэнергии и показатели ее качества для каждого источника электропитания. Центральный процессор передает эти параметры и показатели в нейросетевой контроллер электропитания (НСКЭ), реализующий нейросетевые модели, аналогичные приведенной на рисунке 2. НСКЭ передает в ЦП номер фидера, обеспечивающего в настоящий момент лучшее качество электроэнергии. В соответствии с рекомендацией от НСКЭ, а также после выполнения алгоритма исключения частых переключений ЦП через модуль управления kontaktорами (МУК) воздействует на контакторы 1К и 2К, подключая к шине гарантированного питания (ШГП) соответствующий фидер через выключатели 1В и 2В.

#### Список литературы

1. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; Пер. с польского И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
2. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; Пер. с польского И. Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
3. Применение теории графов для автоматизации процесса анализа схем канализации обратного тягового тока / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов и др. // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2008. – № 4. – С. 77 – 84.
4. Пат. 78580 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/02. Устройство непрерывного контроля технического состояния рельсовых цепей / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов, С. С. Сероштанов,

## Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

М. М. Соколов, И. А. Колесников (Россия). – № 2008131276/22; Заявлено 29.07.2008; Опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.

5. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М: Лань., 2002. – 688 с.

6. Пат. 88158 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/02. Устройство контроля качества электрической энергии / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов, Д. В. Борисенко, С. А. Сушков, М. М. Соколов, С. В. Гришечко, К. А. Петров (Россия). – № 2009127021/22; Заявлено 14.07.2009; Опубл. 27.10.2009. Бюл. № 30.

7. Аввакумов, В. Г. Технико-экономическая оценка качества электроэнергии в промышленности / В. Г. Аввакумов, Г. Л. Багиев, Д. М. Воскобойников / Ленинградский гос. ун-т. – Л., 1977.– 132 с.

8. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд.: Пер. с англ. / С. Хайкин. М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

9. Пат. 78579 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/02. Устройство автоматического переключения источников электропитания / С. А. Лунев, Д. В. Борисенко, М. М. Соколов (Россия). – № 2008131275; Заявлено 29.07.2008; Опубл. 27.11.2008. // Открытия. Изобретения. – 2008. – № 33.

---

УДК 656.25+621.396.9

А. А. Любченко

### **АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ**

*В статье приведены возможные варианты структуры системы определения местоположения подвижной единицы (СОМП) на основе Глобальной навигационной спутниковой системы, полученные в результате анализа зарубежных проектов по исследованию возможности применения спутниковой навигации на железнодорожном транспорте, а также представлены требования, предъявляемые к СОМП со стороны железнодорожного сектора для различных областей применения.*

Применение технологий Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) является одним из наиболее активно развивающихся направлений во всем мире, что обусловлено преимуществами глобальной спутниковой навигации и постоянно улучшающимся качеством навигационного сервиса.

Стратегия развития железнодорожного транспорта России до 2030 г. определяет использование средств спутниковой навигации как одно из наиболее перспективных направлений разработки систем интервального регулирования с технологией «подвижного» блок-участка, в том числе и для малодеятельных участков железной дороги, часто имеющих стратегическое значение. Стремление использовать подобный принцип регулирования может объясняться более низкой стоимостью внедрения и обслуживания системы, что является актуальным в последние десятилетия для таких участков дорог, когда много линий с низкой интенсивностью движения было закрыто ввиду высоких затрат на их содержание. В данном случае речь идет о системах, связанных с обеспечением безопасности движения, где определение местоположения подвижной единицы осуществляется с помощью только бортовых устройств.

Реализация такого подхода на практике и его интеграция в систему централизованной автоблокировки может способствовать

– сокращению затрат как на развертывание системы, так и на ее обслуживание, что обусловлено возможностью сокращения или даже, возможно, полной замены традиционных систем оборудования железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ);

# Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- увеличению пропускной способности железнодорожных линий;
- снижению количества случаев вандализма и кражи объектов инфраструктуры;
- сокращению необходимого времени для определения «узких мест» и их устранения;
- менее затратной и более быстрой модернизации инфраструктуры;
- оптимизации потребления энергетических ресурсов.

Однако для железнодорожного сектора применение ГНСС актуально не только в составе систем обеспечения безопасности движения, но и в других областях. Возможные направления применения технологий ГНСС на железнодорожном транспорте представлены на рисунке 1.

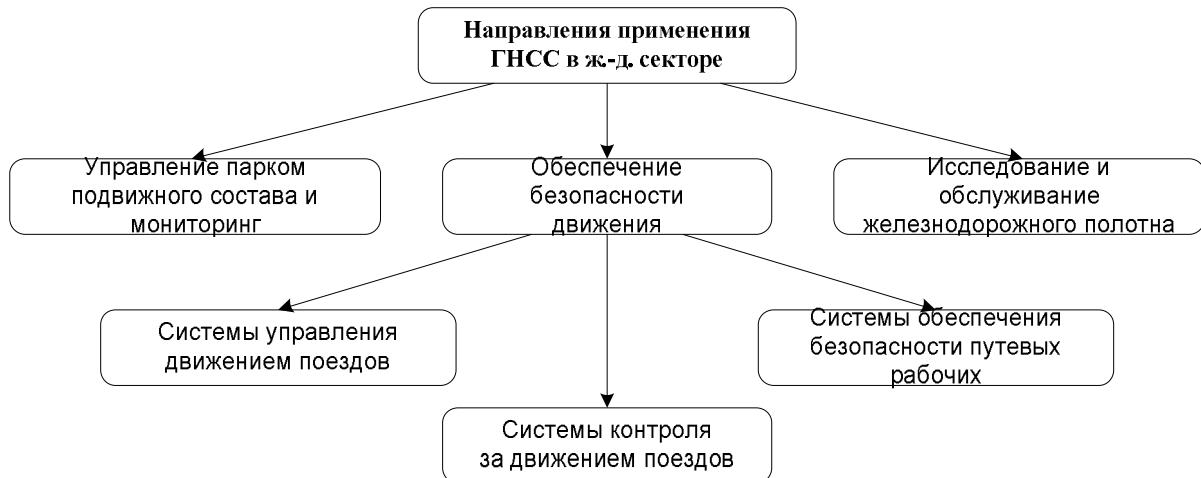


Рисунок 1 – Основные направления применения технологий ГНСС

Мониторинг парка подвижного состава и управление им представляют собой комплекс технических и организационных мер по контролю за перемещением подвижного состава для организации учета расходов, предупреждения краж, обеспечения пользователей услугами железной дороги актуальной информацией о возможных задержках прибытия. Спутниковая навигация применяется также для исследования состояния железнодорожного полотна (например, геометрии рельсового пути) для гарантирования безопасного прохождения состава. В обеспечении безопасности движения выделяются системы управления и системы контроля за движением поездов. Разница заключается в том, что в первом случае функции по обеспечению безопасности полностью возложены на СОМП и дополнительные подсистемы, а во втором в контуре управления находится человек, который выполняет функции по обеспечению безопасного движения на основе данных, получаемых от СОМП.

На сегодняшний день существуют различные варианты организации СОМП на базе ГНСС, поэтому проведение анализа возможных решений является необходимым этапом для выбора конкретного подхода при реализации СОМП для направлений, представленных на рисунке 1. Прежде всего для данных направлений необходимо сформулировать требования, которые должны быть предъявлены к СОМП в отношении характеристик навигационного сервиса, определяющих его качество, а именно:

горизонтальной точности положения. Величина, определяющая несоответствие измеренного местоположения в заданный момент времени истинному на горизонтальной плоскости;

предела тревоги для ошибки по горизонтали (ПТГ). ПТГ – максимальная допустимая ошибка в вычисления местоположения;

времени до тревоги (ВДТ). ВДТ – время, в течение которого пользователь должен быть проинформирован, если превышен ПТГ;

риска целостности (РЦ). РЦ определяет вероятность того, что пользователь не будет проинформирован о превышении допустимой величины ошибки в течение ВДТ. РЦ опреде-

лен для наиболее критичных режимов функционирования и поэтому измеряется в единице, деленной на 150 с (1/150 с);

непрерывности (НП). НП характеризует способность навигационной системы гарантированно предоставлять сервис, когда это действительно необходимо, таким образом, определено для наиболее критичных стадий функционирования;

доступности (ДП). ДП – это процент времени от всего срока функционирования системы, когда сервис предоставлен в соответствии с требуемыми точностью, целостностью и непрерывностью в любой точке зоны покрытия.

Требования, предъявляемые к характеристикам навигационного сервиса для конкретной области применения, были определены в ходе работы форума «*GNSS Rail Advisory Forum*», посвященного данной проблематике. Однако эти требования имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что представленные выше характеристики навигационного сервиса были предложены Международной организацией гражданской авиации (*ICAO*) и изначально были направлены на сектор авиации, тогда как современные зарубежные системы ЖАТ характеризуются *RAMS*-параметрами, определенными стандартами *CENELEC* (*EN 50126*, *EN 50129* и др.). Как результат, не были определены значения для риска целостности, от которого, исходя из определения, зависит вероятность опасных отказов, которая в свою очередь должна соответствовать четвертому интегральному уровню безопасности (*SIL4*).

В соответствии с международным стандартом *IEC 61508* интегральный уровень безопасности характеризует безопасность всей системы и характеризуется вероятностью опасного отказа в час ( $P_{oo}$ ), и для систем ЖАТ вероятность опасного отказа должна быть меньше  $10^{-9}$  1/ч (*SIL4*). Так как речь идет о возможности использования спутниковой технологии в обеспечении безопасности движения, то отсутствие подтверждения о ПТГ в течение ВДТ можно расценивать как опасный отказ. Тогда значение РЦ, удовлетворяющее *SIL4*, может быть выражено следующим образом:

$$P\bar{C} = P_{oo} \cdot \frac{150 \text{ с}}{150 \text{ с}}, \quad (1)$$

где  $P_{oo} = 10^{-9} \frac{1}{1 \text{ ч}}$ .

Следовательно, требуемое значение:

$$P\bar{C}_{\text{тр}} = 10^{-9} \frac{1}{3600 \text{ с}} \frac{150 \text{ с}}{150 \text{ с}} = \frac{10^{-9}}{24} \frac{1}{150 \text{ с}} = 4,2 \cdot 10^{-11} \frac{1}{150 \text{ с}}. \quad (2)$$

Таким образом, можно определить, что требуемый уровень РЦ для железнодорожной отрасли должен быть приблизительно меньше чем  $10^{-10} \frac{1}{150 \text{ с}}$ . Следовательно, требования, предъявляемые к характеристикам сервиса ГНСС, могут быть представлены данными таблицы 1.

В настоящее время помимо сервисов спутниковой навигации, предоставляемых американской системой *GPS* и отечественной Глонасс, существуют системы космического базирования, осуществляющие рассылку дифференциальных корректировок и дополнительной информации, которые позволяют повысить характеристики навигационного сервиса как для *GPS*, так и для Глонасс. В таблице 2 приведены данные по трем таким системам: Европейской *EGNOS* (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), американской *WAAS* (*Wide Area Augmentation System*) и отечественной Системы дифференциальных корректировок и мониторинга (СДКМ) [3].

# Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Таблица 1 – Требования, предъявляемые железнодорожным сектором к навигационным характеристикам спутниковых систем навигации (доверительная вероятность – 95 %)

Применение спутниковых систем навигации	ГТ	Целостность системы			НП, %	ДП, %
		ПТГ	РЦ, 1/150с	ВДТ, с		
Управление парком подвижного состава и мониторинг	50 м	125 м	–	< 10	–	99,90
Исследование и обслуживание железнодорожного полотна	1 мм	0,1 см	–	< 10	–	99,00
<i>Обеспечение безопасности движения</i>						
Линии с высокой интенсивностью (более 48 пар поездов в сутки для однопутных линий и более 100 – для двухпутных)	1 м	2,5 м	< 10 <sup>-10</sup>	< 1	> 99,98	> 99,98
Линии со средней интенсивностью (более 24 пар поездов в сутки для однопутных линий и более 50 – для двухпутных)	10 м	20 м	< 10 <sup>-10</sup>	< 1	> 99,98	> 99,98
Линии с низкой интенсивностью (менее восьми пар поездов в сутки)	25 м	50 м	< 10 <sup>-10</sup>	< 1	> 99,98	> 99,98

На основании данных таблицы 2 можно сделать вывод о том, что ни одна из существующих сегодня систем, дополняющих ГНСС, не позволяет достичь требуемого уровня РЦ. Более того, данные, представленные в таблице 2, характеризуют так называемый «сигнал в космосе», т. е. не учитывается реальное окружение подвижного объекта, а следовательно, влияние атмосферы, эффект многолучевого распространения и затенение, что может вносить существенные погрешности в измерения.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика, навигационного сервиса системы *EGNOS*, *WAAS* и СДКМ (доверительная вероятность – 95 %)

Система дифференциальных корректировок и дополнений	ГТ, м	Целостность системы		ДП, %
		РЦ, 1/150с	ВДТ, с	
СДКМ	1,5	–	–	99,7
<i>EGNOS</i>	1,5	2 · 10 <sup>-7</sup>	6,0	99,9
<i>WAAS</i>	1,2	1 · 10 <sup>-7</sup>	6,2	100,0

Из-за случайного характера численных значений характеристик навигационного сервиса могут быть предложены различные варианты структуры СОМП для применения в железнодорожной отрасли, чтобы посредством избыточной информации от дополняющих подсистем гарантировать требуемый уровень точности, безопасности и доступности.

В ходе анализа результатов европейских проектов по внедрению технологий ГНСС на железнодорожном транспорте было выделено пять возможных вариантов структуры СОМП (рисунок 2).

Автономная система позиционирования фактически представляет собой приемник ГНСС-сигналов, следовательно, точность данного подхода определяется характеристиками конкретной ГНСС, для GPS – от 4 до 10 м, Глонасс – от 10 до 20 м с вероятностью 95 %. Под автономной системой понимается также комплекс оборудования, позволяющий одновременно принимать радионавигационные сигналы от различных ГНСС. В данном случае совместное использование сигналов *GPS* и Глонасс позволяет повысить доступность радионавигационных сигналов, так как возможность одновременного приема сигналов от двух систем увели-

## Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

чиваются количество видимых (доступных) спутников. Однако в настоящее время система Глонасс не представлена полной группировкой спутников, что может приводить к значительным ошибкам при определении координат подвижного объекта.

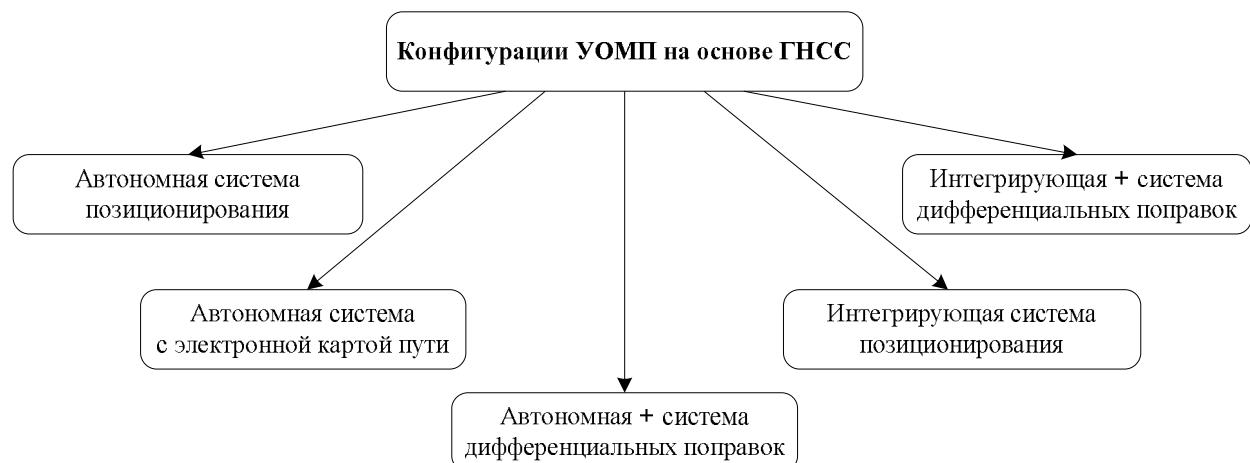


Рисунок 2 – Варианты структуры СОМП на основе ГНСС

Автономная система с электронной картой пути – это подход, описанный ранее, но комбинирующий данные от ГНСС с данными цифровой карты пути. Данный подход применяется в проекте *LOCOPROL* и реализует гиперболический позиционный алгоритм *1-D*, позволяющий достичь  $P_{oo}$  от  $10^{-9}$  1/ч до  $10^{-11}$  1/ч. Однако точность в данном случае представлена в виде доверительного интервала, который гарантированно содержит объект (локомотив), и величина этого доверительного интервала – меньше 550 м с вероятностью 95 %.

Автономная система с дифференциальными поправками реализуется через ГНСС-приемник и антенну для приема корректирующих сообщений и другой информации или эти два приемника могут быть совмещены в одном устройстве. Примером может быть система дифференциальных поправок *HA-NDGPS* (*High Accuracy Nationwide Differential GPS*), развертываемая на территории США и предназначенная для повышения точности от 10 до 30 см с вероятностью 95 % в интеллектуальной системе управления железнодорожным движением *Positive Train Control*.

Интегрирующая система позиционирования производит обработку данных спутниковой навигации и дополнительных измерительных преобразователей (датчиков) с применением алгоритма фильтрации (например, фильтр Калмана). При этом могут использоваться три типа дополнительных датчиков: инерциальные датчики (гироскоп, акселерометр и т. д.) [1], датчики приближения (токовихревой датчик) и тахометры (одометр). Инерциальные датчики и тахометры предоставляют относительную координату, более того – они способны накапливать ошибку. Токовихревые датчики так же, как и технология ГНСС, определяют абсолютную координату. Точность интегрирующей системы позиционирования при сочетании данных от систем *GPS* и Глонасс и инерциальных датчиков может достигнуть 3 м с вероятностью 95 % (проект *APOLO*).

Характеристики интегрирующей системы позиционирования могут быть улучшены с помощью дифференциальной коррекции. Комбинация данных *GPS*, Глонасс, поправок Европейской дифференциальной системы *EGNOS* и информации от инерциальных датчиков позволяет достичь точности 1 м с вероятностью 95 % (проект *APOLO*).

Отдельные варианты из приведенных конфигураций СОМП могут быть использованы по направлениям, представленным на рисунке 1, при удовлетворении требований, предъявляемых данной областью применения к характеристикам СОМП (см. таблицу 1). Если требова-

## Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

ния выполняются, то, например, СОМП может быть использована в составе информационной управляющей системы подвижным объектом, принципы построения которой рассмотрены в работе [2].

В ходе анализа результатов проектов по исследованию возможности применения ГНСС на железнодорожном транспорте были сделаны следующие выводы:

1) автономная система позиционирования не позволяет обеспечить выполнение требований к характеристикам ГНСС из-за эффекта многолучевой интерференции и затенения, ошибки от которых могут быть исключены с помощью интегрирующей системы позиционирования с дифференциальными поправками;

2) все варианты структуры кроме автономной системы позиционирования могут быть использованы на малодеятельных участках (проекты *APOLLO*, *DemoOrt*, *INTEGRAL*, *LOCOPROL*);

3) высокоточная электронная карта обязательна для приложений, связанных с безопасностью, так как она позволяет свести задачу к варианту с одним измерением и перевести географические ГНСС координаты в топологические (координаты вдоль рельсового пути). Более того, дешевле построить электронную карту пути, чем разворачивать собственную систему дифференциальных поправок наземного базирования;

4) существующие подходы на основе ГНСС (п. 2) способны удовлетворить требованиям малодеятельных участков, тогда как этого нельзя сказать относительно железнодорожных линий европейской системы *ETCS* (*European Train Control System*) ввиду следующих факторов:

различное происхождение требований к ГНСС и системам сигнализации и безопасности;

в железнодорожном секторе отсутствует такая характеристика, как непрерывность, так как сложно определить периоды наиболее опасного функционирования, а следовательно, и продолжительность этих периодов. Необходимо определить, как правильно применять эту характеристику в железнодорожной безопасности;

высокие требования доступности. Например, доступность *ETCS* подсистемы счета числа оборотов колеса (одометра) должна быть больше чем 99,999 %. Если система позиционирования гарантирует доступность не выше 99 %, то это будет соответствовать возможным 87 ч недоступности системы. Следовательно, большое число дополнительных измерителей необходимо использовать, чтобы достичь требуемой доступности;

5) интеграция технологии ГНСС, токовыххревых датчиков и электронной карты пути (проект *DemoOrt*) является наиболее подходящей для обеспечения непрерывности позиционирования;

6) использование технологий ГНСС может повысить эффективность работы систем автоматической переездной сигнализации.

### Список литературы

1. Инерциальные навигационные системы [Текст] / А. П. Клепач, А. В. Прокуряков и др. // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 9. – С. 10 – 12.
2. Марюхненко, В. С. Системный анализ навигационного обеспечения подвижных транспортных объектов: Монография [Текст] / В. С. Марюхненко; Под ред. д-ра техн. наук, профессора Ю. Ф. Мухопада / Иркутский гос. техн. ун-т. Иркутск, 2008. – 80 с.

## **ОГРАНИЧЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ**

*В статье проанализированы возможности применения алгоритмов параллельных вычислений в цифровой обработке сигналов и ограничения, накладываемые на них. Значительное внимание уделено вопросу вычисления быстрого преобразования Фурье на параллельно соединенных процессорах. Сделаны замечания, играющие важную роль при распараллеливании вычислений. Кроме того, рассмотрены условия, при соблюдении которых можно получить наибольшую производительность системы.*

Задачи по разработке современной радиотехнической аппаратуры постоянно ставят вопросы об увеличении вычислительной мощности устройств, на которых реализуются алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС). Так как важное место среди алгоритмов ЦОС занимают расчеты быстрого преобразования Фурье (БПФ), то возникает необходимость в распараллеливании вычисления БПФ на несколько процессорных ядер. Существующие сигнальные процессоры имеют конечную производительность. Одним из методов дальнейшего повышения вычислительной мощности является параллельное выполнение расчетов, но увеличение количества ядер не приводит к линейному росту производительности всей системы. Процессоры, связанные между собой через стандартные интерфейсы обмена, не дают бесконечного увеличения скорости передачи данных. Кроме того, начинают проявляться накладные расходы на синхронизацию вычислителей, на организацию обмена данными между ними и т. д. Распараллеливание можно выполнить разными способами, но важно следить за тем, чтобы структура вычислителя соответствовала решению необходимой задачи. Информационные потоки между разными процессорами должны быть распределены наиболее оптимально с точки зрения минимизации передаваемых данных.

Данная задача не является новой. Одна из возможных схем распараллеливания вычислений БПФ с использованием транспьютероподобных сигнальных процессоров представлена в работе [1, с. 48 – 50], но в этой работе не приведена оценка времени, затрачиваемого на обмен данными между процессорами.

Произведем оценку возможности распараллеливания вычислений с учетом времени, необходимого на передачу данных. Предварительно сделаем два общих замечания.

1. Если имеется  $n$  процессорных ядер, причем  $n-1$  ядер выполняют вычисления за промежутки времени меньшие чем  $T_1$ , а хотя бы одному ядру требуется время  $T_1$ , то общее время работы всей параллельной системы будет равно  $T_1$ . Поэтому важно следить за тем, чтобы ни одно ядро не было загружено больше остальных. Обратная ситуация, когда один вычислитель выполняет операций меньше других, вполне допустима, так как приводит к простоте только одного ядра, а не всех.

2. Стоит, по возможности, уменьшить обмен данными между процессорами. Увеличение трафика приводит к увеличению накладных расходов времени на организацию совместной работы, так как ресурсы тратятся не на вычислительные операции, а на операции, связанные с передачей данных.

Таким образом, необходимо максимально равномерно распределить вычисления между ядрами. Так как БПФ есть лишь линейная комбинация одинаковых операций, называемых «бабочками», то просто необходимо эти «бабочки» разделить поровну (насколько это возможно) между процессорами.

В качестве примера рассмотрим 16-точечное БПФ по основанию 2 с прореживанием по времени (рисунок 1). Для случая с прореживанием по частоте все рассуждения будут аналогичны.

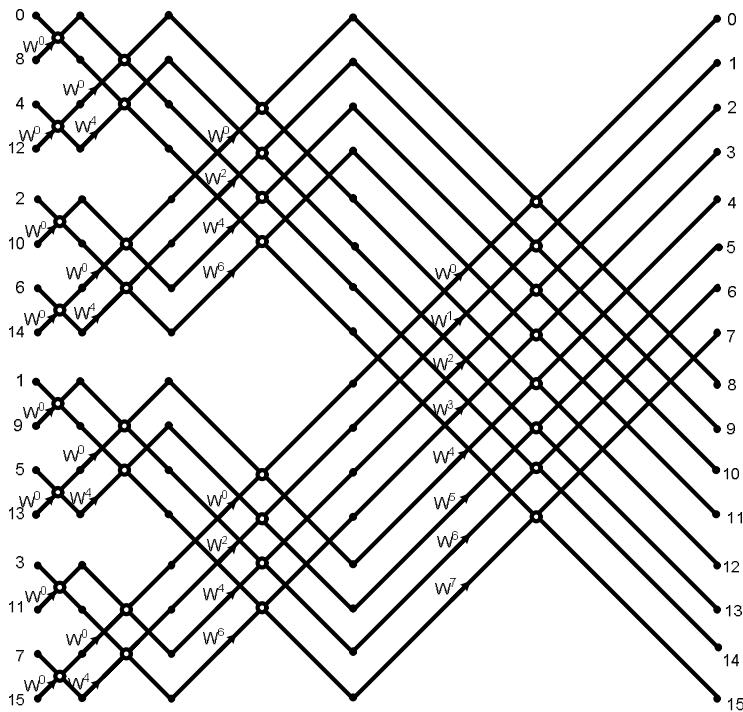


Рисунок 1 – Алгоритм вычисления 16-точечного БПФ с прореживанием по времени с основанием 2

Как видно из рисунка 2, б, в, для четырех ядер возможно несколько структур с одинаковой производительностью. Ситуация осложняется, когда число ядер не кратно числу «бабочек», т. е. если делить 16-точечное БПФ не на четыре процессора, а, скажем, на три (рисунок 2, а). В этом случае возможна следующая загрузка системы: два ядра обсчитывают по 11 «бабочек» и одно ядро считает только 10 «бабочек». Однако, исходя из замечания 1, общая производительность системы будет такой, как будто каждое ядро вычисляет по 11 «бабочек», т. е. ядро номер 3 будет простаивать.

При этом легко посчитать производительность ядра в «бабочках». Иногда этот показатель даже приводят в описаниях на тот или иной сигнальный процессор. Следовательно, требуемое количество ядер для реализации БПФ с учетом замечания 1 можно рассчитать по формуле:

$$N_{core} = \left\lceil \frac{N_c N_b}{N_p} \right\rceil, \quad (1)$$

где  $N_c$  – количество тактов процессора, затрачиваемых на расчет одной «бабочки»;

$N_b$  – общее количество бабочек в БПФ-алгоритме;

$N_p$  – допустимое время на вычисление БПФ, выраженное в тактах процессора.

Число  $N_b$  может принимать разные значения для различных оснований БПФ [5, с. 400], например, для основания 2 формула (1) примет вид:

$$N_{core} = \left\lceil \frac{N_c N_s}{2N_p} \log_2 N_s \right\rceil, \quad (2)$$

где  $N_s$  – количество точек, над которыми выполняется БПФ.

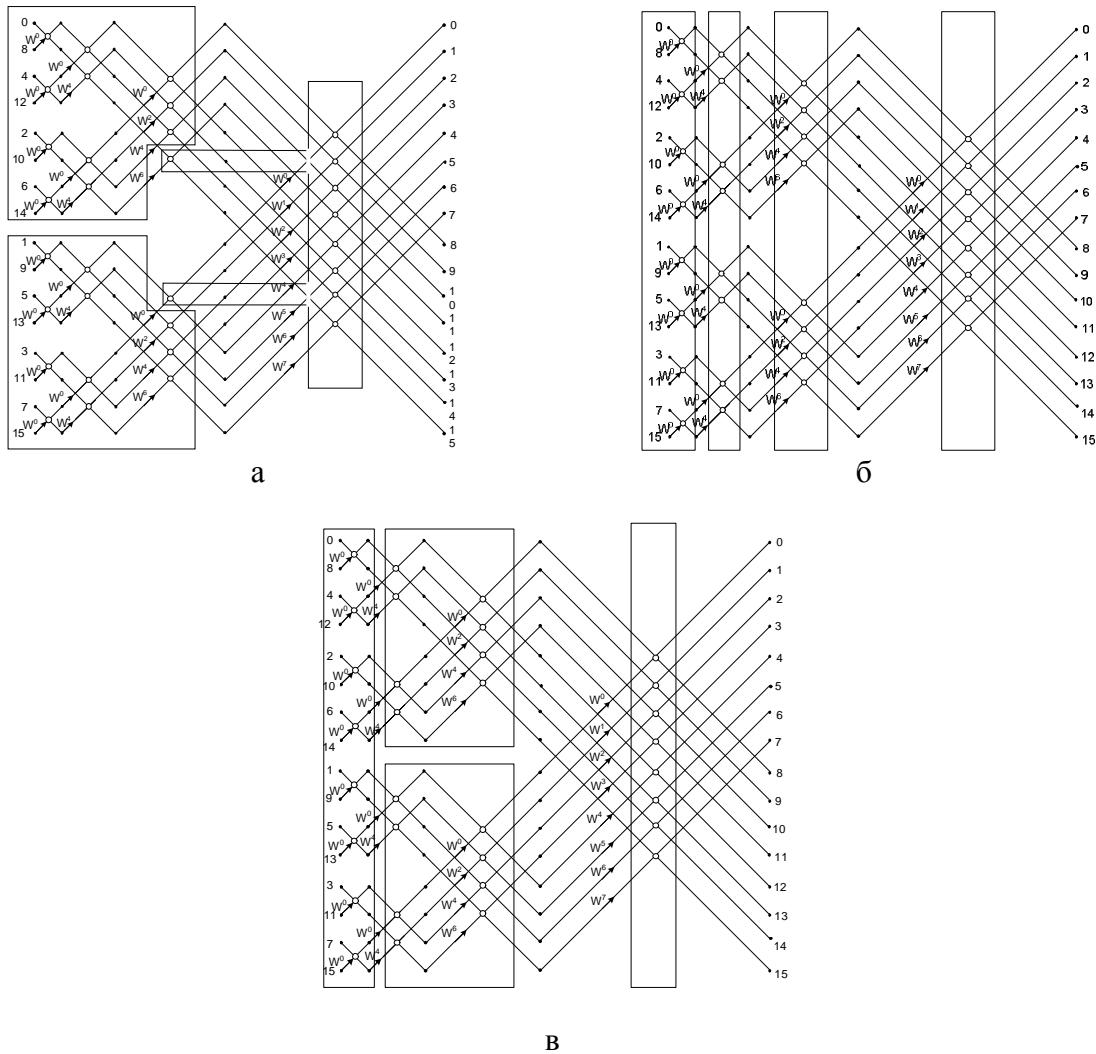


Рисунок 2 – Варианты распараллеливания вычисления БПФ на несколько процессоров

Теперь рассмотрим вопросы межпроцессорного обмена. В настоящее время линковые порты являются стандартным интерфейсом межпроцессорного обмена. Обычно линковый порт может передать за один такт 1 байт данных. Отметим, что современные сигнальные процессоры способны выполнять операции вычисления одновременно с операциями чтения (записи) данных, поэтому возможно, что для передачи данных потребуется большее количество времени, чем для выполнения вычислений. Рассмотрим в качестве примера следующую ситуацию.

Пусть выполняется 16-точечное БПФ по основанию 2 (см. рисунок 1) с точностью вычисления  $R = 32$  бита. Расчет одного узла «бабочки» с прореживанием по времени для входных чисел  $A$  и  $B$  и выходных  $X$ ,  $Y$  состоит из следующих операций [2, с. 400, 401]:

$$X = A + W_N^k B; \quad (3)$$

$$Y = A - W_N^k B, \quad (4)$$

где  $W_N^k$  – поворачивающие множители, которые могут быть предварительно рассчитаны и помещены в память процессора.

Таким образом, для вычисления необходимо одно комплексное умножение, комплексное сложение и вычитание. Это соответствует четырем умножениям и шести сложениям действительных чисел в сигнальном ядре.

Быстрое преобразование Фурье по основанию 2 не является единственным. Существуют алгоритмы вычисления и по другим основаниям. Известно, что алгоритм БПФ по основанию 4 в вычислительном плане является более эффективным, чем алгоритм по основанию 2. При увеличении размера входного массива количество умножений для основания 2 хорошо аппроксимируется формулой [3, с. 36, 37]:

$$\frac{N_s}{2} \log_2 N_s, \quad (5)$$

а для основания 4 – формулой:

$$\frac{3N_s}{8} (\log_2 N_s - 2). \quad (6)$$

Легко заметить, что для последнего случая требуется меньшее количество умножений. Рассмотрим случай для основания 2 как более простой. При этом вполне можно будет оценить соотношение между временем, необходимым для вычислений и для обмена трафиком. Предположим, что  $N_c = 3$ . Это примерная оценка, так как даже для одного типа процессоров, количество тактов в большей степени зависит от конкретного алгоритма вычисления. Следовательно, если разместить каждую стадию БПФ на одном процессоре, то потребуется обсчитать 8 «бабочек», что займет 24 такта процессорного времени. При использовании 8-битного ( $R_{link} = 8$ ) линкового порта процессора для передачи (приема) данных для одного узла требуется  $N_{ic}$  тактов:

$$N_{ic} = \frac{4R}{R_{link}}. \quad (7)$$

Стоит заметить, что цикл передачи для одного процессора будет являться циклом приема для следующего. Это пояснено на рисунке 3.

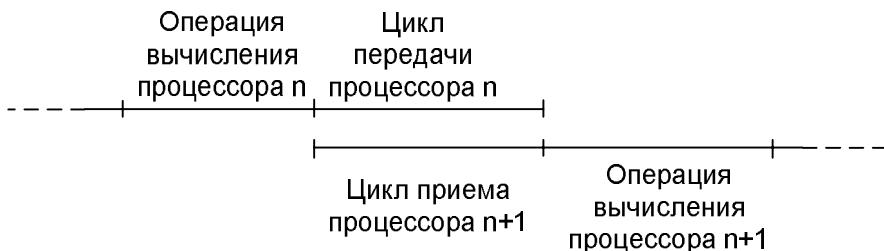


Рисунок 3 – Соответствие циклов приема (передачи) процессоров

Для каждой «бабочки» необходимо передать 128 бит данных (т. е. два комплексных 32-битных числа, состоящих из реальной и мнимой частей). Таким образом, для передачи двух точек для одной «бабочки» требуется 16 тактов, т. е. весь массив из восьми точек одним линковым портом можно будет передать не быстрее чем за 128 тактов, что примерно в пять раз больше, чем требуется для вычислений.

Таким образом, существует минимальное количество уровней БПФ, которые имеет смысл размещать на одном ядре, чтобы избежать временных расходов на обмен трафиком. Рассчитаем эту величину.

Для начала напомним о замечании 1, так как оно действительно и для межпроцессорного обмена: низкая пропускная способность многопроцессорной системы на одном уровне кон-

## Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

вейерных вычислений ограничивает передачу данных от входа до выхода всей системы в целом. Сколько уровней БПФ имеет смысл размещать на одном ядре?

Итак, процессорное время, расходуемое на обмен трафиком между уровнями, на основе формулы (7) определяется так:

$$T_{ic} = \frac{4RN_b}{8K} = \frac{RN_b}{2K}, \quad (8)$$

где  $R$  – используемая разрядность вычислений;

$K$  – количество задействованных линковых портов. А время, непосредственно требуемое для вычислений, определяется формулой:

$$T_c = N_b N_c M, \quad (9)$$

где  $M$  – количество уровней БПФ, вычисляемых одним ядром. Таким образом, для исключения расхода времени на обмен трафиком, должно выполняться условие:

$$T_{ic} \leq T_c. \quad (10)$$

Теперь можно определить количество уровней БПФ, выполняемых на одном ядре, при котором распараллеливание не будет требовать дополнительного расхода времени на обмен данными:

$$M \geq \frac{R}{2KN_c}. \quad (11)$$

Так как  $N_c$  – параметр, характеризующий вычислительную мощность процессора, а  $R$  характеризует точность вычислений и не может быть легко изменен, то наиболее простым механизмом повышения эффективности параллельных вычислений является увеличение  $K$ . Хотя тут тоже возникают сложности, связанные с ограниченным числом линковых портов на процессорах.

Стоит заметить, что в данном случае возрастают требования к используемому объему памяти. Так как операции приема (передачи) выполняются одновременно с вычислениями, то для этих данных необходимы собственные буферы. Поэтому общее число памяти, необходимое для хранения данных, увеличивается на  $4N_s R$  битов.

Таким образом, результаты работы могут быть использованы при построении на железной дороге беспроводных высокоскоростных сетей передачи данных. Назначение сетей может быть любым. Это и предоставление пассажирам поездов доступа к Интернету, и помехозащищенная служебная связь. Кроме того, материалы статьи будут полезны при построении радиотехнических систем удаленного мониторинга подвижного состава, передающих значительные объемы информации.

### *Список литературы*

1. Нагулин, Н. Е. Алгоритм параллельного вычисления быстрого преобразования Фурье для транспьютероподобных сигнальных процессоров [Текст]/ Н. Е. Нагулин, С. Н. Нагулин // Цифровая обработка сигналов. – 2008. – № 7.
2. Гоулд, Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. / Б. Гоулд, Л. Рабинер. – М.: Мир, 1978.
3. Richard, V. N. OFDM for wireless multimedia communications / V. N. Richard, Pr. Ramjee asad. – London: Artech House, 2000.

А. А. Хряков

## **КОМПЕНСАЦИЯ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ В СЧЕТЧИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

*В статье рассматриваются основные проблемы измерения постоянного тока в счетчиках электрической энергии, анализируются причины, приводящие к снижению точности измерений, приводятся методы их устранения. Рассматривается метод повышения точности измерений с применением системы коррекции смещения нуля в реальном масштабе времени.*

В последнее время широкое распространение получают системы коммерческого и технического учета электрической энергии. Одним из ключевых направлений применения системы является учет электрической энергии на тягу поездов постоянного тока. Однако в настоящее время существует всего несколько устаревших счетчиков электрической энергии с низким классом точности и отсутствием интерфейсов для работы в автоматизированной системе учета [1], а также несколько современных электронных устройств [1], предназначенных скорее для мониторинга энергосистем ввиду низкого класса их точности. Между тем назрела потребность в высокоточных системах коммерческого учета на постоянном токе для нужд железной дороги.

Структура счетчика электрической энергии для постоянного тока близка к структуре счетчика для переменного тока, за исключением одной детали. Счетчики переменного тока не обрабатывают постоянную составляющую. Кроме того, на начальных стадиях обработки она исключается с помощью высокочастотных фильтров и в результате не оказывает практически никакого влияния на процесс измерения и дальнейшей обработки данных. В счетчиках постоянного тока основную информацию несет постоянная составляющая, в результате тракт измерения постоянного тока имеет те же проблемы, что и любой измерительный прибор с усилителем постоянного тока и трактом преобразования и обработки данных с постоянной составляющей. Если учесть, что к счетчикам постоянного тока для коммерческого учета предъявляются требования не ниже высокоточных счетчиков переменного тока, то несложно понять, что помимо линейности измерительного тракта, точности усиления сигнала и других параметров, свойственных системам переменного тока, при измерении постоянного тока добавляется требование калибровки смещения нуля.

Помимо постоянного смещения нуля, которое компенсируется аппаратной или программной калибровкой, имеет место так называемый дрейф нуля, вызванный особенностями аналогового тракта. Даже незначительное смещение нуля в счетчике постоянного тока может привести к ощутимым погрешностям в измерении. В этом – основное отличие систем учета постоянного тока от систем переменного тока.

Явление дрейфа нуля обнаружил еще в начале века русский профессор В. П. Мышкин [2], обративший внимание на то, что при тонких метрологических измерениях ошибки повторяются с неизменным постоянством. Мышкин предположил, что виной феномену – окружающее пространство, которое, непрерывно изменяя какие-то свои параметры, действует и на стрелку прибора. Свое предположение профессор подтвердил экспериментально.

Дрейфом нуля (нулевого уровня) называется самопроизвольное отклонение напряжения или тока на выходе усилителя от начального значения. Поскольку дрейф нуля проявляется таким образом, как будто он вызван входным сигналом постоянного тока, то его невозможно отличить от истинного сигнала.

Явление дрейфа нуля обусловлено несколькими факторами:

- влиянием помех;
- утечками печатной платы (вызываемые в том числе и повышенной влажностью), которые создают дополнительные токи смещения;

## Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- нестабильностью аналоговых компонентов при изменении напряжения питания;
- изменением параметров аналоговых компонентов со временем (старение);
- нестабильностью аналоговых компонентов при изменении температуры окружающей среды.

Фактор влияния помех устраняется экранированием и правильно выбранной топологией печатной платы и, если требуется, применением специальных защитных элементов, уменьшающих влияние помех.

Дрейф нуля, вызванный утечками печатной платы, вполне ощутим и может вызвать массу проблем при достижении требуемой точности. Особенno сильно влияние данного фактора при изменении влажности воздуха. Даже при небольшом изменении влажности смещение нуля может быть значительным, если входные сигналы имеют малую амплитуду. Основные причины нарушения работы электронной аппаратуры, связанные с воздействием влажности воздуха, наличием в его составе агрессивных соединений и загрязнением печатных плат, приведены в работе [2]. К ним относятся анодное растворение металла, диффузия металлических ионов, осаждение металлических ионов, коррозия. Основной способ борьбы с такими утечками связан с использованием цепей в тракте измерения с низким сопротивлением, применением специальной топологии печатной платы (например, использование внутренних слоев, если плата имеет четыре слоя или более) и покрытием влагозащитным лаком всех токоведущих поверхностей и выводов компонентов.

Воздействие изменения напряжения питания сводится к минимуму благодаря новым высокостабильным и точным стабилизаторам в источнике питания, а также схемным решениям в составе интегральных усилителей, обеспечивающих низкую их чувствительность к изменениям питающего напряжения.

Фактор старения можно уменьшить выбором компонентов, наименее подверженных изменению параметров с течением времени.

Факторы, вызывающие дрейф нуля, непосредственно связаны с аналоговыми компонентами, с технологией их производства и использованием в конкретной схеме. Как правило, тракт измерения включает в себя усилители постоянного тока на основе операционных усилителей (ОУ) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые и являются основными элементами, вызывающими дрейф нуля. Наиболее сильное влияние на смещение нуля ОУ и АЦП оказывает изменение температуры. Поскольку температурные изменения параметров компонентов имеют закономерный характер, то в некоторой степени они могут быть скомпенсированы. Однако сложность схемных решений для подобной системы компенсации пропорциональна требуемой точности.

Рассмотрим простейший типовой тракт аналого-цифрового преобразования сигнала токового шунта с применением дифференциального усилителя и АЦП, схема которого приведена на рисунке 1.

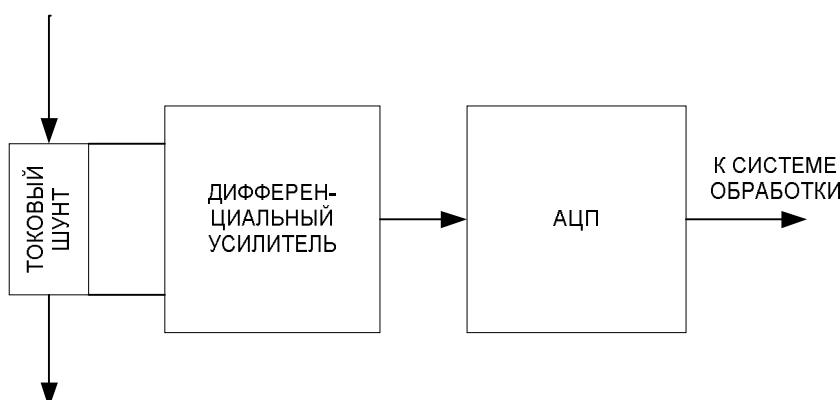


Рисунок 1 – Тракт аналого-цифрового преобразования сигнала токового шунта

## Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Для упрощения системы питания схемы используется измерительный усилитель производства Analog Devices AD623A, который может работать от однополярного источника питания. Для сравнения рассмотрим также более дорогие усилители – AD620D от Analog Devices и INA118PB от Texas Instruments. В качестве АЦП используем шестиканальный преобразователь AD73360 от Analog Devices.

АЦП типа AD73360 при источнике опорного напряжения 2,5 В имеет диапазон входных значений напряжения  $U_{\text{АЦП max}}$ , равный  $\pm 0,82$  В, что соответствует полному диапазону преобразования 16 двоичных разрядов. Согласно ГОСТ 10287-83 (1990) [3] максимальный измеряемый ток счетчика постоянного тока должен составлять 150 % от номинального значения. Источником сигналов является токовый шунт типа 75ШСМ.М с номинальным выходным напряжением 75 мВ.

Коэффициент усиления  $K$  входного усилителя определяется по формуле:

$$K = \frac{U_{\text{АЦП max}}}{1,5U_{\text{ш ном}}} \approx 7,29, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ш ном}}$  – номинальное напряжение измерительного шунта,  $U_{\text{ш ном}} = 75$  мВ;  $U_{\text{АЦП max}}$  – максимальное значение входного напряжения АЦП,  $U_{\text{АЦП max}} = 820$  мВ.

Таким образом, чтобы привести максимальное значение напряжения с выхода шунта к максимальному диапазону АЦП, используем усилитель с коэффициентом усиления 7. При этом максимальное входное напряжение АЦП составит  $\pm 0,81$  В, что соответствует требованиям [3] к максимальному измеряемому току с небольшим запасом.

В таблице 1 приведены величины дрейфа нуля для трех наиболее популярных инструментальных усилителей.

Таблица 1 – Напряжение дрейфа нуля инструментальных усилителей

Параметр дрейфа нуля	AD623A	AD620B	INA118PB
$\Delta U_{\text{см.вх}}$ , мкВ	0,1	0,1	2
$\Delta U_{\text{см.вых}}$ , мкВ	10	2,5	–

Для первых двух инструментальных усилителей производитель указал отдельно величины дрейфа нуля для входа и выхода, а для последнего – только обобщенное значение по входу. Для первых двух усилителей максимальный диапазон изменения выходного напряжения, вызванный дрейфом нуля в диапазоне температур от  $T_1$  до  $T_2$  и при коэффициенте усиления  $K$ , определяется по формуле:

$$\Delta U = K \cdot \Delta U_{\text{см.вх}} (|T_1| + T_2) + \Delta U_{\text{см.вых}} (|T_1| + T_2), \quad (2)$$

при  $K=7$  в диапазоне температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до плюс  $70^{\circ}\text{C}$  выходное напряжение составляет 1,177 мВ для усилителя AD623A и 0,352 мВ – для усилителя AD620B.

Для усилителя INA118PB максимальный диапазон изменения выходного напряжения, вызванный дрейфом нуля, при аналогичных условиях составляет 1,54 мВ и определяется по более простой формуле:

$$\Delta U = K \cdot \Delta U_{\text{см.вх}} (|T_1| + T_2). \quad (3)$$

Определим погрешность, вызванную дрейфом нуля входного усилителя, по формуле для каждого типа усилителя:

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_{\text{ш ном}} \cdot 1,5K} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

## Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Для AD623A эта погрешность составит 0,15 %, для AD620B – 0,045, для INA118PB – 0,195 %. Как видим, наименьшую погрешность обеспечивает один из наиболее дорогих инструментальных усилителей – AD620B.

Однако некоторые АЦП (в том числе и AD73360) имеют дифференциальные входы с программируемыми усилителями и позволяют подключать источник сигнала напрямую, минуя дополнительные измерительные усилители при условии, что источник сигнала будет иметь достаточно низкое внутреннее сопротивление. Минимальное входное сопротивление АЦП AD73360 составляет 25 кОм. Токовый шунт на 500 А имеет сопротивление 0,00015 Ом, т. е. в  $16 \times 10^7$  раз больше входного сопротивления АЦП. Шунты на большие токи имеют соответственно еще меньшие сопротивления. В этом случае нет необходимости применять дополнительный измерительный усилитель перед АЦП, который только добавит ошибку в измеряемый сигнал собственным дрейфом нуля.

При прямом включении токового шунта к АЦП необходимо использование встроенного программируемого усилителя АЦП. Для определения коэффициента усиления встроенного усилителя можно воспользоваться формулой (1). Однако усилитель имеет только ограниченный ряд коэффициентов усиления (2, 4, 8, 10 и т. д.), поэтому выбираем ближайшее к 7,29 значение, равное 8. Номинальное значение в единицах младшего разряда АЦП  $N_{\text{ном}}$ , соответствующее номинальному значению входного напряжения  $U_{\text{ном}}$ , определяется по выражению:

$$N_{\text{ном}} = \frac{2^{15} \cdot U_{\text{ном}} \cdot K}{U_{\text{АЦП max}}}; \quad (5)$$

$$N_{\text{ном}} = \frac{32768 \cdot 75 \cdot 8}{820} \approx 23976,$$

где  $2^{15}$  – количество отсчетов 16-разрядного АЦП в биполярном режиме работы;

$K$  – коэффициент усиления входного усилителя;

$U_{\text{АЦП max}}$  – максимальное входное напряжение АЦП с отключенным усилителем, соответствующее полному рабочему диапазону АЦП и равное 820 мВ.

При  $U_{\text{ном}} = 75$  мВ и  $K = 8$  после округления получаем  $N_{\text{ном}} = 23976$ . Согласно требованиям [3] относительная погрешность измерения для счетчиков класса точности 0,2 не должна превышать 1 % при уровне входного сигнала, составляющем 10 % от номинального значения, что соответствует 10 % от  $N_{\text{ном}}$  и составляет 2398. При этом теоретически достижимая относительная погрешность измерения, определяемая весом младшего разряда АЦП, составит 0,042 %. Таким образом получаем значительный запас по точности при использовании 16-разрядного АЦП без учета погрешностей, вносимых аналого-цифровым трактом.

Однако прямое включение источника сигнала не устраниет проблемы смещения и дрейфа нуля входных аналоговых цепей АЦП. Наиболее эффективный метод борьбы с дрейфом заключается в калибровке нуля АЦП в реальном масштабе времени. Однако существующие системы калибровки, как правило, рассчитаны на применение АЦП, имеющих время установления выходных данных в течение одного цикла преобразования. Высокоточные АЦП типа «сигма – дельта» получили широкое распространение в системах учета электрической энергии благодаря более простой схемотехнике, но ввиду особенности построения (наличие передискретизации с дальнейшим прореживанием и цифровой фильтрацией) они имеют длительное время установления данных, что делает их непригодными в системах с быстрым переключением каналов. Поэтому для каждого канала измерения в реальном времени выделяется отдельный АЦП такого типа.

Опишем систему с переключением каналов АЦП типа «сигма – дельта» с целью измерения ошибки смещения и дрейфа нуля в реальном масштабе времени. Коррекция ошибки

производится на программном уровне за счет ее предварительного вычисления в цикле калибровки нуля.

Упрощенная структурная схема системы аналого-цифрового преобразования с коррекцией смещения и дрейфа нуля приведена на рисунке 2.

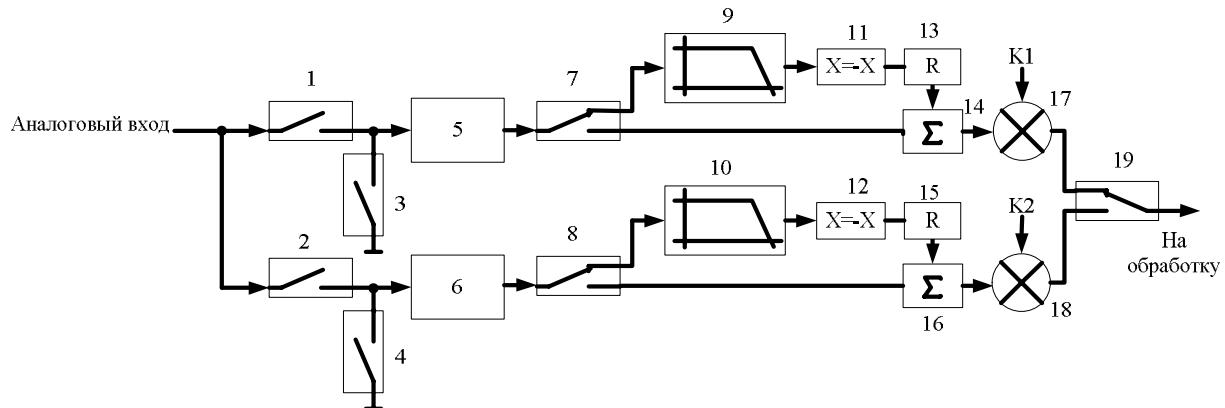


Рисунок 2 – Система коррекции смещения и дрейфа нуля АЦП

В состав системы входят работающие синхронно АЦП 5 и 6 типа «сигма – дельта». Синхронность достигается одновременным начальным запуском отдельных или совмещенных на одном кристалле АЦП. В состав системы входят два идентичных тракта измерения, которые могут работать либо в режиме измерения ошибки смещения нуля, либо в основном режиме с коррекцией ошибки смещения, вычисленной в первом режиме. В режиме измерения ошибки смещения нуля размыкается ключ 1 и замыкается ключ 3. Ключ 3 обеспечивает быстрое установление нулевого уровня на входе АЦП 5. Дальнейшая обработка производится на программном уровне. Селектором 7 данные направляются в низкочастотный фильтр 9 для выделения постоянной составляющей смещения нуля, затем полученное значение с обратным знаком 11 помещается в ячейку памяти для коррекции ошибки в измерительном цикле. В режиме измерения с коррекцией смещения ключ 1 замыкается, а ключ 3 размыкается. Полученные на АЦП 5 данные селектором 7 направляются в сумматор 14 для вычитания ошибки смещения, хранящейся в ячейке памяти 13, затем масштабируются в умножителе 17 для выравнивания коэффициентов усиления каналов и поступают на селектор 19.

Второй канал с АЦП 6 работает идентично. АПЦ типа «сигма – дельта» имеет длительное время восстановления, поэтому основным рабочим каналом, с которого данные поступают на дальнейшую обработку, является только один из каналов. Второй канал находится в режиме измерения ошибки смещения, который может длиться достаточно долго, в зависимости от скорости изменения напряжения смещения нуля (дрейфа нуля), определяемой условиями внешней среды. Затем происходит переключение каналов: второй канал переходит в режим измерения данных с коррекцией ошибки смещения и спустя время восстановления АЦП селектор 19 переводит получателя данных на этот канал. После этого первый канал начинает процесс измерения ошибки смещения, а второй канал становится основным. Далее цикл повторяется. Необходимо отметить, что при переключении каналов оба канала некоторое необходимое время работают одновременно в режиме измерения входных данных, пока вновь подключенный канал не начинает выдавать действительные данные после установления режима АЦП после переключения. Схема смены режимов работы каналов показана на рисунке 3.

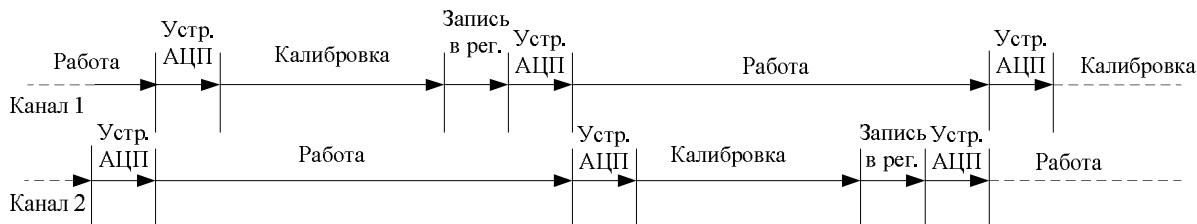


Рисунок 3 – Временная схема работы АЦП

Период смены каналов определяется скоростью дрейфа нуля системы. Если учесть, что на смещение нуля наибольшее влияние оказывает изменение температуры, то вполне целесообразно выбирать период калибровки с учетом максимальной скорости изменения температуры окружающей среды и термостабильности аналоговых входных цепей, вызывающих смещение нуля под воздействием температуры. Выходные данные каждого канала домножаются на постоянные коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$ , которые вычисляются при первоначальной калибровке всего устройства, обеспечивают идентичность усиления двух каналов и нормируют сигнал. Учитывая наличие входного программируемого усилителя на входе АЦП, уровень выходного сигнала для первого канала можно описать выражением:

$$y_n = ((K_{1a} \cdot x_n + \alpha_1) - \beta_1) \cdot K_{1d} \quad (6)$$

или

$$y_n = (K_{1a} \cdot x_n + \alpha_1 - \beta_1) \cdot K_{1d}, \quad (7)$$

где  $x_n$  – входной сигнал;

$K_{1a}$  – коэффициент усиления входного аналогового сигнала встроенным программируемым усилителем АЦП 5;

$\alpha_1$  – суммарная ошибка смещения нуля входных аналоговых цепей и АЦП первого канала в рабочем режиме;

$\beta_1$  – корректирующее значение смещения нуля, хранимое в регистре 13;

$K_{1d}$  – коэффициент усиления выходного цифрового сигнала умножителем 17 (значение  $K_1$ ).

Соответственно для второго канала выходные данные будут описываться выражением:

$$y_n = (K_{2a} \cdot x_n + \alpha_2 - \beta_2) \cdot K_{2d}. \quad (8)$$

В идеальном случае, когда  $\alpha_1 = \beta_1$ , ошибка смещения нуля должна устраняться полностью, однако как входные данные, так и полученное в цикле калибровки значение коррекции смещения нуля  $\beta_1$  являются величинами, приведенными к конечной разрядности АЦП. Поэтому остается ошибка, связанная с квантованием данных величин. Ошибка  $\alpha_1$  просуммирована с полезным сигналом, а величина  $\beta_1$  вычисляется при отсутствии сигнала, т. е. при  $x_n = 0$ . Таким образом, формула (2) будет иметь более точный вид:

$$y_n = \left( \frac{\text{round}((K_{1a} \cdot x_n + \alpha_1) \cdot 2^k)}{2^k} - \frac{\text{round}(\beta_1) \cdot 2^k}{2^k} \right) \cdot K_{1d}, \quad (9)$$

где  $\text{round}(s)$  – операция округления над выражением  $s$ ;

$2^k$  – разрядность АЦП.

При  $x_n = 0$  значения  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  полностью равны друг другу. Однако при  $x_n \neq 0$  в результате округления возможно отбрасывание максимум половины веса младшего разряда АЦП, а в сумме с аналогичным округлением величины  $\beta_1$  максимальная теоретически достижимая ошибка будет составлять  $\pm 1$  разряд сетки АЦП. Поэтому данный метод позволяет достичь максимальной точности коррекции смещения нуля  $\pm 1$  младший разряд АЦП при условии, что скорость изменения смещения нуля будет незначительной по отношению к частоте калибровки. На точность калибровки нуля могут оказывать влияние погрешности АЦП, а также их идентичность, поэтому наилучшие параметры калибровки можно достичь, применяя АПЦ, выполненные на одном кристалле в едином технологическом цикле и, как результат, имеющие близкие параметры. Такие АЦП обычно имеют возможность синхронной работы, что также важно для обеспечения точности преобразования.

Так как наибольшее влияние на смещение нуля оказывает изменение температуры, то время непрерывной работы одного канала до его переключения в режим калибровки в простейшем случае можно описать неравенством:

$$T \leq \frac{U_{\text{доп}}}{\Delta u \cdot v(t)} - \lambda_f, \quad (10)$$

где  $U_{\text{доп}}$  – допустимое значение смещения нуля;

$\Delta u$  – смещение нуля входных аналоговых цепей при изменении температуры;

$v(t)$  – скорость изменения температуры окружающей среды;

$\lambda_f$  – постоянная времени низкочастотного цифрового фильтра (9 и 10).

Для упрощения формулы задержки переключения каналов и время установления действительных данных на выходе АЦП типа «сигма – дельта» опущены, так как их величина значительно меньше величины постоянной времени низкочастотного цифрового фильтра.

Период переключения каналов составит соответственно  $2T$ . Наибольшая точность вычисления смещения нуля достигается при меньшей скорости изменения температуры. Однако наилучшие результаты при выборе периода переключения каналов можно получить, применив датчик температуры и использовав для получения скорости изменения температуры  $v(t)$  показания датчика во времени. Следует отметить также, что после подачи питания аппаратная часть системы начинает разогреваться и достигает стабильного значения температуры спустя некоторое время (обычно от нескольких минут до нескольких десятков минут). В течение этого времени период переключения каналов необходимо выбирать из скорости собственного нагрева.

На рисунке 2 приведена упрощенная структурная схема системы с коррекцией дрейфа и смещения нуля. На практике часто необходимо работать с источником сигналов, используя вход АЦП дифференциального типа. В этом случае аппаратная часть (ключи 1 – 4 и АЦП 5, 6) имеет вид, представленный на рисунке 4.

В представленной структурной схеме пары ключей 1, 2 и 3, 4 работают синхронно, а ключи 5 и 6 аналогичны ключам 3 и 4 на рисунке 2.

Практическая реализация данной схемы требует минимального влияния сопротивления открытых ключей и их токов утечки. До недавнего времени электронные ключи, способные обеспечить класс точности 0,1 и лучше для измерения тока от токового шунта, или не производились, или требовали повышенного напряжения питания. Относительно недавно появились электронные ключи, способные обеспечить класс точности 0,1 и лучше для измерения тока от токового шунта при низком напряжении питания (не более 5 В). Например, ключи серии ADG71x обеспечивают крайне низкое сопротивление в открытом состоянии (не более 4 Ом) и низкий ток утечки (менее  $\pm 0,2$  нА) при напряжении питания 5 В.

## Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Низкое сопротивление токового шунта ( $0,00015 \Omega$ ) и высокое входное сопротивление АЦП позволяют уменьшить влияние токов утечки электронных ключей и добиться минимальной погрешности, вносимой предлагаемым схемным решением. Проверим влияние электронных ключей на процесс измерения напряжения токового шунта. При этом возьмем ключ с худшими параметрами, чем ADG71x. Ключ ADG51x является более дешевой альтернативой, у него худшие параметры токов утечки и более высокое сопротивление открытого канала. Упрощенно схему включения (рисунок 4) с открытыми входными ключами можно представить видом на рисунке 5.

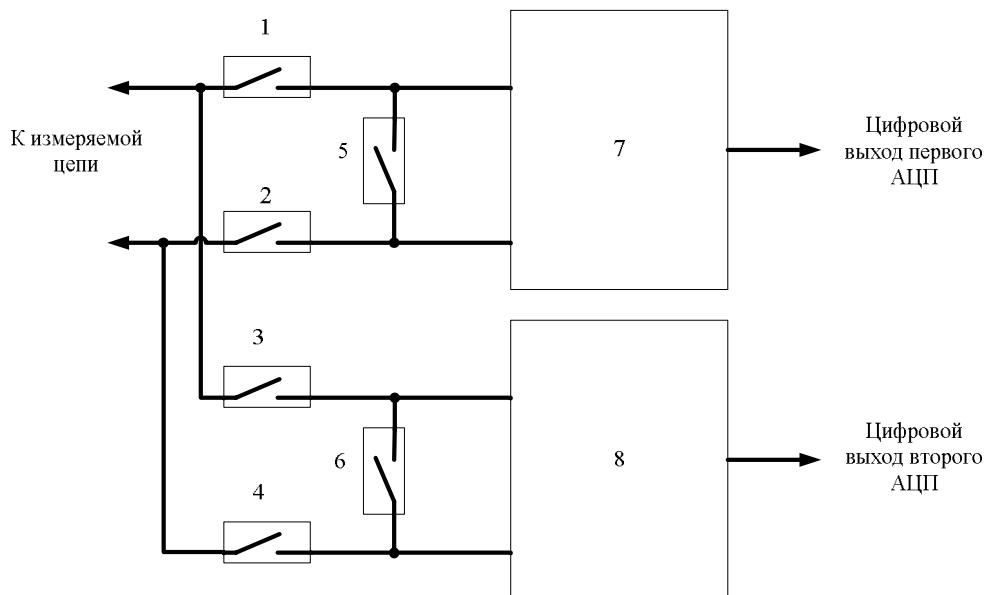


Рисунок 4 – Структурная схема дифференциального входа АЦП с коррекцией смещения нуля

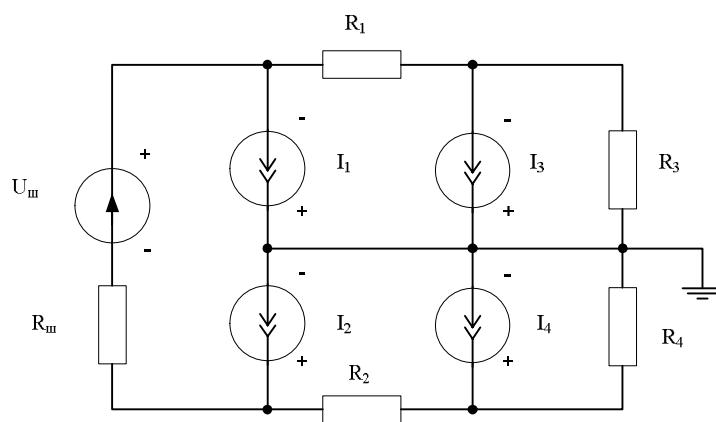


Рисунок 5 – Упрощенная эквивалентная схема входной цепи

Токовый шунт представлен источником напряжения  $U_{\text{ш}}$  с внутренним сопротивлением  $R_{\text{ш}}$ . Внутреннее сопротивление открытых входных ключей  $R_1$  и  $R_2$  (ключи 1, 2 и 3, 4 согласно рисунку 4) составляет около  $40 \Omega$  и изменяется под воздействием температуры и изменения входного напряжения на  $\pm 10 \Omega$  [3]. Максимальные токи утечки ключей  $I_1$  –  $I_4$  составляют  $\pm 5 \text{ нА}$ . Благодаря ультранизкому внутреннему сопротивлению шунта, которое составляет  $0,00015 \Omega$ , влияние токов утечки ключей  $I_1$  и  $I_2$  на изменение напряжения шунта крайне слабое, им можно пренебречь. Сопротивление дифференциальных входов АЦП

( $R_3$  и  $R_4$ ) составляет 25 кОм. Учитывая симметричность схемы и использование дифференциального входа АЦП, можно определить влияние токов утечки  $I_3$ ,  $I_4$  и изменения сопротивления ключей  $R_1$  и  $R_2$  для одного плеча. В этом случае напряжение на входном сопротивлении АЦП  $R_3$

$$U_{R3} = \frac{U_{\text{ш}}/2R_1 - I_3}{1/R_1 + 1/R_3}. \quad (11)$$

Однако при отсутствии токов утечки сопротивление входного ключа  $R_1$  и входное сопротивление АЦП  $R_3$  образуют линейный делитель напряжения с коэффициентом  $K$ , который изменяется при изменении сопротивления открытого ключа  $R_1$ . Как было отмечено выше, сопротивление открытого ключа ADG51x изменяется при изменении температуры от -40°C до +75°C и при изменении входного сопротивления на ±10 Ом и составляет номинальную величину сопротивления 40 Ом. Подставив в формулу (11) значение тока утечки  $I_3 = 0$ , значения  $R_1 = 40$ ,  $R_3 = 25000$ , определим значение напряжения на входе АЦП без влияния тока утечки и определим постоянный коэффициент  $K$ , который необходимо ввести при измерении напряжения в соответствии с простой формулой:

$$K = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{R3}} \text{ или } K = \frac{\frac{U_{\text{ном}}}{2}}{\left( \frac{1}{R_1^{\text{ном}}} + \frac{1}{R_3} \right)} = 1 + \frac{R_1^{\text{ном}}}{R_3}, \quad (12)$$

где  $R_1^{\text{ном}}$  – номинальное значение сопротивления открытого ключа  $R_1$ .

После домножения входного напряжения АЦП на  $K$  получим значение напряжения с шунта без учета погрешностей. Далее определим погрешность, вносимую изменением сопротивления ключа  $R1$  ( $R2$ ) и влиянием максимального тока утечки ключа  $I3$  ( $I4$ ), составляющего 5 нА, по формуле:

$$\lambda = \frac{U_{\text{ном}}}{U_3 \cdot K} \cdot 100 \% . \quad (13)$$

При номинальном значении входного напряжения 0,075 В максимальная погрешность составит примерно 0,041 %, что является удовлетворительной величиной даже для класса точности 0,1. Однако на практике коэффициент  $K$  определяется калибровкой для номинального (или максимального) входного напряжения и исключить при этом влияние токов утечки ключей невозможно. Можно только уменьшить влияние изменения сопротивления открытого ключа, производя калибровку при постоянной средней температуре, например +25 °C. Калибровка нуля, производимая при разомкнутых входных ключах и крайне низком сопротивлении шунтирующего вход АЦП ключа (менее 50 Ом) позволяет получить максимально точное значение ошибки смещения нуля АЦП.

Таким образом, подобный способ компенсации смещения нуля в реальном времени способен повысить точность измерения постоянного тока в системах учета электрической энергии электроподвижного состава постоянного тока и на тяговых подстанциях, а отказ от дорогостоящих входных измерительных усилителей позволяет снизить стоимость устройства, повысить его точность и снизить энергопотребление, а также отказаться от сложной системы питания аналогового тракта. Следует отметить, что основное электроснабжение тягового подвижного состава на Западно-Сибирской железной дороге производится на постоянном токе.

# Организация производства на транспорте

## Список литературы

1. Фирсанов, К. А. Использование процессоров цифровой обработки сигналов в счетчиках постоянного тока в системах учета электрической энергии на тягу поездов [Текст] / К. А. Фирсанов, А. А Хряков // Естественные науки и экология: Межвуз. сб. науч. тр. / Омский гос. пед. ун-т. – Омск, 2008. – Вып. 13. – С. 36 – 40.
2. Швайгарт, Г. Влияние влажности и загрязнений на печатные узлы с бессвинцовой технологией [Текст] / Г. Швайгарт, Х. Вэк. – М.: Техносфера. – 2007. – № 3. – С. 18, 19.
3. ГОСТ 10287-83 (1990). Счетчики электрические постоянного тока. Общие технические условия [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 21 с.

---

УДК 656.223

Э. А. Сафонов, К. Э. Сафонов, Е. С. Семенова

## ИННОВАЦИОННЫЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ МЕТРОПОЛИТЕНОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

*Рассматриваются инновационные пути развития метрополитенов в городах России с учетом зарубежного опыта. Предлагаются пути ускорения строительства, снижения капитальных вложений и себестоимости перевозок. Приводятся результаты расчетов потребности в подвижном составе нового типа для г. Омска на 2016 и 2025 гг.*

Скоростной внеуличный транспорт создает необходимые условия для развития и реконструкции крупных городов страны. Тем не менее темпы его строительства остаются недопустимо низкими. В Транспортной стратегии РФ отмечено, что причиной этого является техническое и технологическое отставание транспорта России по сравнению с развитыми странами, она не готова к повсеместному применению современных технологий, остается на низком уровне инновационная составляющая в развитии парков подвижного состава (ПС) и технических средств транспорта при осуществлении внутренних перевозок. Не получает должного развития городской общественный транспорт, в том числе его современные скоростные виды, которые могли бы существенно снизить остроту проблем транспортного развития мегаполисов [1]. Современное состояние метрополитенов в городах СНГ показано в таблице 1. Как видно из данных таблицы, наиболее активно метрополитены строились в союзных республиках. В городах России в настоящее время, кроме Москвы, строительство метро практически не ведется. В то же время использование новых технических решений позволит резко сократить затраты и ускорить строительство в современных условиях, а «всякая экономия, – по мнению К. Маркса, – в конечном счете сводится к экономии времени».

Таблица 1 – Характеристика действующих метрополитенов в городах СНГ

Наименование города, где находится метрополитен	год ввода в строй	Параметры характеристики метрополитена (по годам)			
		число станций	эксплуатационная длина, двухпутная, км	инвентарный парк, вагоны	пассажирооборот, млн/год
		2010 г.	2010 г.	2007 г.	2007 г.
1	2	3	4	5	6
Москва	1935	182	301,9	4510	2528,7
Санкт-Петербург	1955	63	110,2	1477	832,3
Киев	1960	46	59,9	669	641,8

# Организация производства на транспорте

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Ташкент	1977	29	36,2	212	70,5
Харьков	1975	28	35,3	321	278,3
Баку	1967	22	33,1	244	175,7
Минск	1984	25	30,3	243	262,1
Тбилиси	1966	22	26,3	199	91,8
Нижний Новгород	1985	13	15,5	80	32,5
Новосибирск	1986	12	14,3	84	69,6
Ереван	1981	10	12,1	70	17,3
Самара	1987	9	10,3	46	12,0
Екатеринбург	1991	7	8,5	54	46,4
Казань	2005	6	8,4	20	6,9
Днепропетровск	1995	6	7,1	45	11,4

Эффективность метрополитена зависит от ряда факторов. Основные из них – объем перевозок и их себестоимость. Первый показатель зависит от длины линий метро, второй – от качества технологических решений [2, 3]. Метрополитен является самым капиталоемким видом транспорта. Фондоемкость перевозок пассажиров на метрополитене в восемь раз выше, чем на наземном пассажирском транспорте. Необходимо учитывать, что экономические показатели работы метрополитена зависят от его производительности. Так, при росте годовой работы на 1 км линии метро с 10 до 50 млн пасс./км, т. е. в пять раз, себестоимость перевозки пассажира на 1 км снижается примерно в 10 раз (рисунок 1).

Очередность строительства метрополитенов, а также масштабы и темпы их строительства в крупнейших городах должны определяться экономической целесообразностью, т. е. эффективностью капитальных вложений в развитие скоростных систем городского пассажирского транспорта (ГПТ). Эффективность затрат в системы ГПТ с метрополитеном характеризуется соотношением непосредственного и внеотраслевого эффектов и величины капитальных затрат за период жизни инвестиций. Расчет показателя внутренней нормы эффективности производился за 35-летний период с учетом продолжительности работы основных фондов метрополитена. Как видно из рисунка 2, эффективность капитальных вложений в развитие системы ГПТ с метрополитеном в крупнейших городах возрастает по мере увеличения протяженности линий и удельной загрузки метро. Расчеты подтверждают, что показатель внутренней нормы эффективности затрат более высокий в группе городов, которые уже имеют развитую сеть метрополитена. Следовательно, метро нужно строить быстро, не допуская омертвления капитальных вложений на долгие годы. К сожалению, в Омске и в других городах России дело обстоит иначе.

В феврале 2010 г. исполнилось 25 лет с момента принятия решения о строительстве метрополитена в Омске – пуска линий нет, но за это время произошли серьезные изменения в этой сфере. Мировой опыт и технический прогресс заставляют пересмотреть концепцию строительства омского метрополитена на базе использования инновационных технологий и положений нового генерального плана города (2007 г.). Существующий проект метро отли-

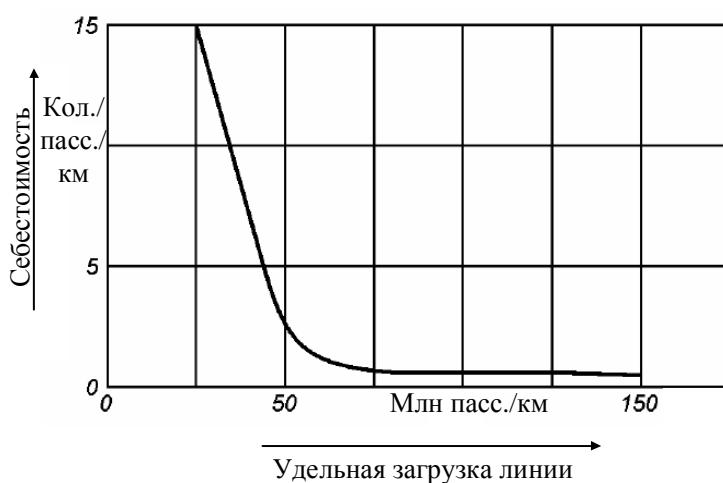


Рисунок 1 – Зависимость себестоимости перевозок на метрополитене от удельной загрузки линии

## Организация производства на транспорте

чается дорогоизнаной строительства и большими эксплуатационными затратами. Использование новых технических решений повысит экономичность метро.

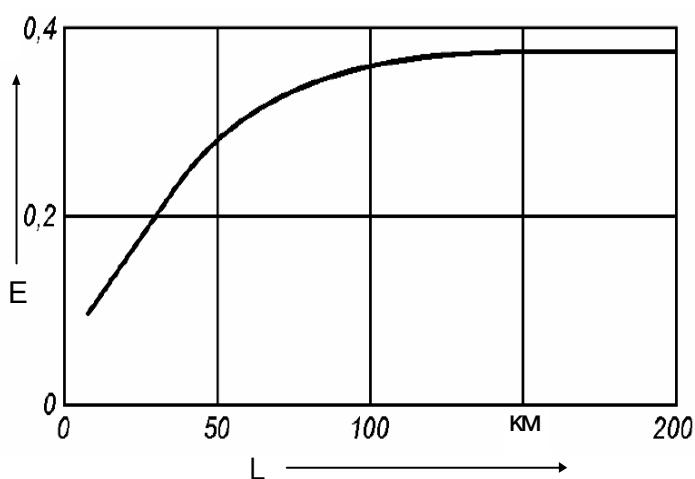


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента внутренней эффективности капитальных вложений  $E$  от длины сети метрополитена  $L$

кабин машиниста в промежуточных вагонах, а также более широким применением электроники в электрооборудовании. Серийное производство данных вагонов продолжается до настоящего времени. В метрополитене ряда городов (Баку, Киев, Минск, Москва, Новосибирск и др.) модели 81-717/714 и их модификации выполняют основной объем перевозок.

В 1990 – 1991 гг. был собран состав из вагонов серии 81-720/721 «Яз». Конструкция этих вагонов принципиально отличается от предыдущих серий: кузов выполнен из нержавеющей стали, использованы современный дизайн, новая тележка. На вагоны установлен тяговый привод с двигателями постоянного тока и тиристорно-импульсной системой управления или асинхронный привод с инверторами на IGBT-транзисторах, это позволило повысить максимальную конструктивную скорость до 100 км/ч. Вместимость новых вагонов по сравнению с вагонами модификации 81-717.5 и 81-714.5 увеличена на 30 – 40 человек, это достигнуто за счет уменьшения посадочных мест и образования вместительных торцевых площадок. Вагоны имеют повышенные эксплуатационную надежность и пожаробезопасность, они оборудованы микропроцессорной системой автоматического управления и технической диагностики, электропневматической системой управления тормозами, системами пожаротушения и пожарной сигнализации, экстренной связи и радиооповещения пассажиров. На случай срочной эвакуации пассажиров предусмотрен аварийный трап.

В 2004 г. на заводе «Вагонмаш» в Петербурге по заказу Петербургского метрополитена были разработаны новые вагоны типа «Ладога». Головным вагонам была присвоена модификация 81-540.8, промежуточным – 81-541.8. Кабина машиниста в головных вагонах внешне осталась похожа на кабину вагонов типа 81-540, сохранив угловатые формы от предшественника, получив декоративные пластиковые накладки. На случай непредвиденных ситуаций в кабине предусмотрена широкая аварийная дверь, на пульте управления машиниста установлен горизонтальный контроллер.

В том же году завод приступил к сборке другого поезда. Новые вагоны получили обозначения 81-553.3 (головные моторные), 81-554.3 (промежуточные моторные) и 81-555.3 (прицепные). За основу взят дизайн третьего состава вагонов типов 81-540.8/81-541.8, который был выпущен для петербургской подземки. Главным отличием новых вагонов от предшественников была установка асинхронных тяговых двигателей чешского производства Skoda Dopravní Technika, заметно изменился дизайн пульта управления поездом. На случай

Сокращение затрат может быть связано с инновационными инженерными и конструктивными решениями и выбором нового типа вагонов. Отечественная промышленность выпускает узкую линейку вагонов для метрополитена. Наиболее распространены вагоны серии 81-714/717, известные как «номерные», так как они имеют только цифровые обозначения. Эти вагоны были разработаны Мытищинским машиностроительным заводом во второй половине 1970-х гг., их вместимость зависит от типа вагона (головной, промежуточный) и составляет 309/330 пасс. От предыдущих моделей они отличаются более мощными двигателями, отсутствием

# Организация производства на транспорте

непредвиденных ситуаций в кабине предусмотрена широкая аварийная дверь. Воздухозaborники вагонов закрыты декоративными металлическими накладками.

Серия вагонов метрополитена 81-740/741 «Русич» выпускается заводом ОАО «Метровагонмаш» с 2003 г. Кузов из нержавеющей стали отвечает современным требованиям дизайна и эргономики. В этой серии вагонов повышена комфортабельность для пассажиров и машинистов, увеличена пассажировместимость, снижен уровень шума, улучшена информированность пассажиров, повышена экономичность в эксплуатации. На вагоны устанавливается асинхронный тяговый привод с двигателями переменного тока и микропроцессорной системой управления. Вагоны имеют повышенные эксплуатационную надежность и пожаробезопасность, они оборудованы микропроцессорной системой автоматического управления и технической диагностики, электропневматической системой управления тормозами, системами пожаротушения и пожарной сигнализации, экстренной связи и радиооповещения пассажиров. Для повышения информированности пассажиров над дверьми салона размещено электронное информационное табло и по желанию заказчика на торцевой стенке салона может быть расположена бегущая строка.

Анализ основных типов серийно выпускаемых в нашей стране вагонов, их модификаций и разновидностей показал, что объединяет их одно – огромная вместимость (800 – 1200 пассажиров на состав). Это связано с исторически сложившейся еще в прошлом веке ориентацией на обслуживание таких мегаполисов, как Москва и Санкт-Петербург. В современных городах-миллионниках, где функционирует или строится метрополитен, такая вместимость не позволяет гибко реагировать на объемы перевозок, которые изменяются по мере увеличения длины линий. В результате коэффициент использования подвижного состава в процессе развития новых метрополитенов остается низким при больших интервалах движения. Кроме того, наши вагоны отличаются большими размерами, шумом, массой и высоким энергопотреблением. Это отрицательно влияет на экономику метрополитенов. В современных условиях к поездам предъявляются более высокие требования по техническим, а главное, по эксплуатационным показателям. К сожалению, наша промышленность не в состоянии гибко реагировать на зарождающийся спрос. Регионы хотят рационально тратить деньги на строительство и эксплуатацию метро. Указанные требования необходимо отразить в новых технических регламентах.

За рубежом в последние годы происходит постепенный переход к автоматизированному общественному транспорту. В нескольких европейских городах подземное метро обходится без машинистов. Преимуществом такой системы является независимость от человеческого фактора: заболевший или опоздавший на работу машинист не станет причиной опоздания для пассажиров. По утверждению специалистов стокгольмского метро, негативных психологических эффектов, таких как ностальгия по объявлению остановок «живым голосом» или осознание, что «за рулем никого нет», от замены машинистов на автоматы в других городских метро не наблюдалось. Двери поездов оснащены сенсорами, по типу тех, что сейчас ставятся в лифтах, чтобы избежать травм пассажиров.

Например, в столице Дании Копенгагене такое нововведение стало уже привычным. Метро, признанное лучшим в мире в 2010 г., принадлежит компании Orestad Development Corporation I/S, которой в свою очередь владеет датское правительство. Управляющая компания Metro Service A/S сделала ставку на короткие, всего три вагона по 100 пассажиров, поезда метро. Эти поезда, курсирующие со средней скоростью около 80 км/ч, но с малыми интервалами, в среднем около 1,5 мин, были изготовлены итальянской фирмой Ansaldo. Ни машиниста и даже намека на кабину в них нет, но внушительное количество контролеров в ярко-красной форме в вагонах и на перронах, готовых как помочь пассажиру, так и проверить его билет, сразу бросается в глаза заезжим туристам.

В Карlsruhe с 1992 г. осуществлен выход подвижного состава легкого рельсового транспорта (ЛРТ) на региональную железнодорожную сеть. Используется подвижной состав с двойной системой питания (750 В, 15 кВ). Подвижной состав ЛРТ обеспечивает удобное бес-

# Организация производства на транспорте

пересадочное сообщение региона (480 км прилегающей сети железных дорог Германии) с городской трамвайной сетью (73,1 км) с высокой частотой движения. Аналогичное смешанное пригородно-городское движение вагонов ЛРТ по трамвайной и железнодорожной сети осуществляется в городах Германии (Кассель, 133,5 км; Саарбрюкken, 27,2 км; Хемниц, 16,5 км; Нордхаузен, 11,4 км), Франции (Париж), Нидерландов (Гаага и др.), США (Трентон-Кэмден), Италии (Сассари), строится в г. Остин, планируется в г. Брауншвайг, Гренобль, Нант, Турку, Вроцлав и ряде других городов мира [4].

Штутгартский U-Bahn, заменивший в 2008 г. трамвай, классифицируется как ЛРТ. Проектирование сети выполнено чрезвычайно гибко. В городском центре и районах плотной застройки U-Bahn проходит в тоннелях мелкого заложения, есть участки на обособленном полотне и прямо на проезжей части улиц. Как и в Париже, здесь уделено внимание взаимодействию сетей. Фирмы S-Bahn и U-Bahn имеют девять совместных станций, две из них – подземные в центральной деловой части города, в которой расположена одна из крупнейших пешеходных зон Германии (длина – около 1,2 км), размещено 460 000 м<sup>2</sup> торговых площадей и 19 000 парковочных мест на внеуличных стоянках. В итоге городской центр доступен «пешему и конному», но при этом достигнуто тщательнейшее разделение пешеходов и автомобильного транспорта [5].

Вот мнение по этому вопросу проф. Вукана Вучика, одного из ведущих экспертов США по общественному транспорту: «Около 100 городов в последние десятилетия построили ЛРТ, или «легкое метро», что является современной версией трамвая... ... ЛРТ имеет несколько меньшую скорость и провозную способность, чем метро, но может обслуживать гораздо большую сеть, поскольку требует инвестиций в восемь раз меньше, чем метро...» [5].

Прогресс помогает пассажирам оплачивать билеты в метро с помощью СМС-сообщений. Для покупки такого билета нужно иметь мобильный телефон с симкартой шведского оператора. Клиент оплачивает билет, посыпая СМС на определенный номер с буквами, которые обозначают вид тарифа и зону обслуживания. После отправки такого СМС пассажиру приходит СМС-билет с контрольным кодом, который действует прямо с этого момента в течение одного часа. При входе в метро или автобус достаточно показать это СМС-уведомление. Стоимость билета чуть дороже обычного бумажного, так как к стандартной цене добавляется плата за отправку СМС-сообщения.

Сокращение затрат при строительстве Омского метро во многом связано с выбором нового типа вагонов поездов. В настоящее время на зарубежном рынке известны несколько разновидностей таких поездов, они могут состоять из двух вагонов общей вместимостью 430 мест длиной 39 м или из трех вагонов по 13 м с аналогичной вместимостью. Использование таких вагонов позволит сократить длину станций почти в два раза – до 60 м. Принципиальное отличие новых поездов заключается в автоматизированном управлении движением (без машиниста и кабины). Экономический эффект возникает за счет снижения эксплуатационных затрат, в том числе за счет пониженного энергопотребления новых поездов. Подобные поезда используются в Копенгагене, Ванкувере, Сеуле и в других городах мира.

Анализ пассажирских и транспортных потоков в Омске показал, что трассировку первой линии метро целесообразно изменить и соединить Левобережье с железнодорожным вокзалом, а не с Московкой, как это было задумано раньше, в период развития ВПК. Это позволит разгрузить исчерпавшие пропускную способность пр. Маркса, ул. 70-лет Октября и мостов.

Таким образом, в 2016 г. планируется пустить первую очередь метро в составе шести станций – Торговый центр, библиотека им. А. С. Пушкина, Заречная, Кристалл, Соборная, Рокоссовского – длиной 8,1 км. К 2025 г. целесообразно пустить всю первую линию до железнодорожного вокзала протяженностью 16,2 км и проложить ее под пр. Маркса.

Потребность в вагонах на оба срока рассчитывается по известной методике, которая использовалась специалистами СибАДИ в 2006 г. при уточнении загрузки первой линии омского метрополитена до 2015 г. [3]. Эта потребность определяется по максимальному пасса-

# Организация производства на транспорте

жиропотоку в одну сторону и зависит от его величины, вместимости состава и длины линии. Приведем пример расчета для первой очереди метро на 2016 г.

1. Потребное количество пар поездов из трех вагонов вместимостью 430 пассажиров, длина поезда – 39 м:

$$N_{\text{п}} = P_{\text{max}} / \Omega , \quad (1)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальный пиковый поток на перегоне в одну сторону, пасс.;

$\Omega$  – общая вместимость поезда метро, 430 пасс.;

$$N_{\text{п}} = 12113 / 430 = 28 \text{ ед.}$$

2. Время оборотного рейса

$$t_{\text{об}} = 2 l / V_3 , \quad (2)$$

где  $l$  – длина линии, км;

$V_3$  – эксплуатационная скорость, км/ч;

$$t_{\text{об}} = 2 \times 8,1 \times 60 / 36 = 27 \text{ мин.}$$

3. Интервал движения поездов

$$t_{\text{дв}} = 60 / N_{\text{п}} , \quad (3)$$

где  $N_{\text{п}}$  – количество пар поездов, ед.;

$$t_{\text{дв}} = 60 / 28 = 2,1 \text{ мин.}$$

4. Необходимое количество составов

$$N_{\text{с}} = t_{\text{об}} / t_{\text{дв}} , \quad (4)$$

где  $t_{\text{об}}$  – время оборотного рейса, мин;

$t_{\text{дв}}$  – интервал движения поездов, мин;

$$N_{\text{с}} = 27 / 2,1 = 13 \text{ ед.}$$

5. Необходимое количество вагонов в движении

$$N_{\text{в}} = N_{\text{с}} N_{\text{м}} , \quad (5)$$

где  $N_{\text{с}}$  – количество составов, ед.;

$N_{\text{м}}$  – количество вагонов в одном поезде метро, ед.;

$$N_{\text{в}} = 13 \times 3 = 39 \text{ ед.}$$

6. Инвентарный парк вагонов, ед.,

$$N_{\text{инв}} = N_{\text{в}} / K_{\text{вып}} , \quad (6)$$

где  $N_{\text{в}}$  – количество вагонов в движении, ед.;

$K_{\text{вып}}$  – коэффициент выпуска на линию;

$$N_{\text{инв}} = 39 / 0,9 = 43 \text{ ед.}$$

Результаты расчета на два срока – 2016 и 2025 гг. – для 13- и 20-метровых вагонов представлены в таблице 2. Расчеты проведены по шести вариантам в зависимости от количества вагонов в составе и их типа.

К реализации на 2016 г. рекомендуется четвертый вариант, а на 2025 г. – шестой. Расчеты показали, что для оптимизации затрат и более полного использования провозной способности станций омского метрополитена (при длине платформы 60 м) целесообразно использовать вагоны длиной 20 м. Вместимость двухвагонного поезда – 430 пассажиров, трехвагонного – 645. Потребность в вагонах в инвентаре на 2016 г. составит 29 ед. (двухвагонный состав), на 2025 г. – 87 ед. (трехвагонный). Интервалы движения в час пик составят по 2,1 мин. Поэтапное наращивание вместимости поездов будет соответствовать увеличению перевозок, что приведет к оптимизации капитальных вложений в развитие метро. Это позволит пустить первую очередь метро к 300-летнему юбилею города и успешно развивать его в дальнейшем.

# Организация производства на транспорте

Таблица 2 – Расчет потребности в ПС для омского метрополитена на 2016 – 2025 гг.

Вариант	Год пуска	Количество вагонов в поезде	Длина линии метро в двухпутном исчислении, км	Максимальный пиковый поток в одну сторону, пасс.	Вместимость поезда, чел.	Количество пар поездов, ед.	Время оборотного рейса, мин.	Интервал движения поездов, мин.	Количество составов в движении, ед.	Количество вагонов в движении, ед.	Количество вагонов в инвентаре, ед.
Вагоны 13 м											
1	2016	3	8,1	12113	430	28	27,0	2,1	13	39	43
2	2025	3	16,2	18500	430	43	54,0	1,4	39	117	130
3	2025	4	16,2	18500	572	32	54,0	1,9	28	112	124
Вагоны 20 м											
4	2016	2	8,1	12113	430	28	27,0	2,1	13	26	29
5	2025	2	16,2	18500	430	43	54,0	1,4	39	78	87
6	2025	3	16,2	18500	645	29	54,0	2,1	26	78	87

Ранее для омского метрополитена рассматривалась возможность использования поезда отечественного производства «Русич» в составе трех вагонов вместимостью 1000 пассажиров (типовая секция). Длина поезда – 90 м, что требует длины платформы в 108 м. При таком варианте изменять вместимость поезда невозможно, что ведет к удорожанию метрополитена.

Для полноценной загрузки метро необходимо организовать подвозящие маршруты наземного транспорта с разворотными площадками возле станций, их потребность и загрузку необходимо рассчитывать дополнительно.

Особое внимание необходимо уделить решению доступности станций метро и пересадочных узлов для инвалидов и других маломобильных групп населения. Если сейчас упустить это из виду, придется столкнуться с проблемами, характерными для других городов [6, 7]. В Москве в 2009 г. открылись три новых станции метро – Митино, Волоколамская и Мякинино. На лестницах и пандусах для инвалидов в подземных пешеходных переходах предусмотрены застекленные павильоны, оборудованные системами инфракрасного обогрева ступеней. Таким образом, в московском метро теперь четыре станций из 182, которые оборудованы специальными пандусами для нужд людей, передвигающихся в инвалидных колясках. В Новосибирске лифтами для инвалидов оборудуют строящуюся станцию метро Золотая нива. Вместе с тем рассматриваются варианты по установке лифтов на действующих станциях метрополитена. В екатеринбургском метро могут появиться специальные лифты для инвалидов лишь в отдаленной перспективе – на станциях, которые уже строятся, они не предусмотрены.

Для ликвидации долгостроя на метрополитенах было бы полезно организовать кооперативное строительство группой городов по согласованному графику, по которому работы проводились бы последовательно в каждом из городов при концентрации технических и финансовых возможностей всех участников. При этом необходимо учитывать региональные особенности строительства [8]. Таким образом, подземную часть строительства можно было бы выполнить в одном городе за три года и заняться пусконаладочными работами, а технику перебазировать в следующий город. В этом случае не будет происходить омертвление капитальных вложений и эффект от метро каждый город получит в кратчайший срок. Такой подход требует серьезной организационной работы и полного доверия между участниками проекта.

Использование новых технических решений и инновационный подход приведут к сокращению капитальных вложений, ускорению сроков строительства метро в городах России, а также к снижению эксплуатационных затрат. Целесообразно организовать производство

# Организация производства на транспорте

вагонов нового типа в нашей стране и обеспечить нормативную основу для развития современных видов транспорта.

## Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. / Министерство транспорта Российской Федерации. – М., 2008.
2. Сафонов, Э. А. Транспортные системы городов и регионов: учебное пособие. [Текст] / Э. А. Сафонов. – М.: АСВ, 2007. – 288 с.
3. Сафонов, Э. А. Эффективность омского метрополитена [Текст] / Э. А. Сафонов, В. В. Бирюков / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 1993. – 38 с.
4. Морозов, А. С. Легкий рельсовый транспорт – результат интеграции трамвая, метрополитена и пригородно-городских железных дорог [Текст] / А. С. Морозов // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы XVI междунар. науч.-практ. конф. / Уральский гос. экон. ун-т. – Екатеринбург, 2010. – С. 91 – 98.
5. Михайлов, А. Ю. Национальные особенности борьбы с проблемами или общие проблемы транспортных систем городов [Текст] / А. Ю. Михайлов // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы XVI междунар науч.-практ. конф. / Уральский гос. экон. ун-т. – Екатеринбург, 2010. – С. 36 – 46.
6. Сафонов, Э. А. Особенности решений омского метрополитена [Текст] / Э. А. Сафонов, К. Э. Сафонов // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы XIII междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: АМБ, 2007. – С. 206 – 209.
7. Сафонов, К. Э. Эффективность организации транспортного обслуживания инвалидов в городах: Монография [Текст] / К. Э. Сафонов. – М.: АСВ, 2010. – 208 с.
8. Сафонов, Э. А. Сибирь и метро [Текст] / Э. А. Сафонов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1995. – № 10. – С. 106 – 111.

---

УДК 620.9:005.93:502.174

М. М. Никифоров

## ЦЕЛЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА НЕТЯГОВЫЕ НУЖДЫ

*В статье предложены целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения железных дорог и целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности использования электроэнергии на нетяговые нужды. Дано оценка перспектив снижения значений предложенных целевых показателей.*

Задача повышения энергетической эффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте является одной из приоритетных при разработке «Энергетической стратегии холдинга «РЖД» до 2015 года и на перспективу до 2030 года и программа ее реализации на 2011 – 2013 гг.». Важнейшими параметрами, которые должны быть определены при разработке энергетической стратегии, являются теоретически достижимые на современном уровне развития науки и техники значения удельного расхода энергоресурсов, а также уровня потерь энергоресурсов при их транспортировке.

# Организация производства на транспорте

Оценка эффективности использования топливно-энергетических ресурсов должна осуществляться по данным о достижении целевых показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности, которые устанавливаются в натуральном и стоимостном исчислении и отражают удельный расход энергетических ресурсов, используемых при перевозочной деятельности.

Для ОАО «Российские железные дороги» как организации, осуществляющей регулируемые виды деятельности в сфере железнодорожных перевозок, Федеральной службой по тарифам установлены следующие целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД».

**Энергоемкость** производственной деятельности ОАО «РЖД» (условное обозначение – Ержд):

в натуральном исчислении (кг у.т./ 10 000 прив. ткм нетто) определяется как отношение годовых суммарных затрат энергоресурсов на производственную деятельность общества к приведенному грузообороту;

в стоимостном исчислении (кг у.т. / тыс. р.) определяется как отношение годовых суммарных затрат энергоресурсов на производственную деятельность общества к величине доходов ОАО «РЖД» от основных видов деятельности.

**Энергоэффективность** производственной деятельности ОАО «РЖД» (условное обозначение – Эржд):

в натуральном исчислении (ткм / кг у.т.) определяется как отношение приведенного грузооборота ОАО «РЖД» к годовым суммарным затратам энергоресурсов на производственную деятельность общества;

в стоимостном исчислении (тыс. р. / кг у.т.) определяется как отношение доходов ОАО «РЖД» от основных видов деятельности к величине годовых суммарных затрат энергоресурсов на производственную деятельность общества.

Указанные интегральные показатели позволяют оценить энергосберегающую деятельность ОАО «РЖД» и рассчитываются в соответствии с «Методикой определения энергоемкости производственной деятельности ОАО «РЖД», утвержденной 21 декабря 2009 г. Следует отметить, что перечисленные целевые показатели отражают эффективность использования топливно-энергетических ресурсов для ОАО «Российские железные дороги» в целом.

Однако для оценки эффективности работы отдельных хозяйств, филиалов, дочерних и зависимых обществ ОАО «Российские железные дороги» требуется установить собственные целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности, отражающие специфику потребления ими энергоресурсов.

Для системы тягового электроснабжения железных дорог в качестве целевых показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности предлагается принять:

1) удельный расход электрической энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций;

2) уровень небаланса электроэнергии на тягу поездов, отпущенное по счетчикам тяговых подстанций и потребленной по счетчикам электроподвижного состава;

3) расход электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций.

В условиях проходящего реформирования структуры ОАО «Российские железные дороги», связанного с разделением процессов ремонта и эксплуатации подвижного состава и стационарных объектов, не представляется возможным выполнить анализ энергетической эффективности потребления электроэнергии на нетяговые нужды на основе только статистики об объемах потребления электроэнергии на нетяговые нужды и объемах выполненной перевозочной работы.

## Организация производства на транспорте

При этом следует отметить, что значительное количество линейных подразделений железных дорог не ведут статистической отчетности об объемах выполненной работы, так как осуществляют эксплуатацию и текущий ремонт инфраструктурных объектов ОАО «РЖД» (дистанции электроснабжения, сигнализации и связи, гражданских сооружений, пути), что не зависит напрямую от объемов перевозочной работы.

Для оценки энергетической эффективности потребления электроэнергии на нетяговые нужды в ОАО «РЖД» целесообразно принять три целевых показателя энергосбережения и повышения энергетической эффективности:

1) доля расхода электроэнергии на нетяговые нужды в общем объеме потребления электроэнергии в ОАО «Российские железные дороги»;

2) отношение условно-постоянной и переменной составляющих расхода электроэнергии на нетяговые нужды;

3) удельный расход электрической энергии на выпуск единицы продукции (объема эксплуатационной работы) по видам работ для линейных подразделений хозяйств и дирекций, определенный по переменной составляющей расхода электрической энергии на нетяговые нужды.

При проведении анализа изменения целевых показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения необходимо учитывать, что на первые два показателя оказывают влияние не только режимы работы системы тягового электроснабжения, но и техническое состояние и режимы эксплуатации электроподвижного состава, а также состояние учета электроэнергии на нем.

Анализ динамики удельного расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций показывает, что основным фактором, способствующим снижению удельного расхода электроэнергии на тягу поездов является рост объемов перевозочной работы.

Одним из основных показателей, характеризующих состояние учета потребления электроэнергии на тягу поездов, является значение небаланса между расходом электроэнергии на тягу поездов, отпущеной с шин тяговых подстанций (с учетом потерь в тяговых трансформаторах), и расходом электроэнергии, потребленной по счетчикам электроподвижного состава, т. е. «условные» потери (далее – небаланс). Небаланс включает в себя технологические и коммерческие потери.

Технологические потери электроэнергии определяются технологией ее транспортировки от границы балансовой принадлежности системы тягового электроснабжения к электроподвижному составу, а также работой различных систем и устройств, связанной с организацией перевозочного процесса. Среднее расчетное значение технологических потерь электроэнергии по сети железных дорог находится в диапазоне 4,4 – 8,5 %.

Превышение значения небаланса над уровнем технологических потерь представляет собой коммерческие потери, обусловленные недостатками системы учета электроэнергии на тягу поездов, в том числе за счет ее отбора от контактной сети на эксплуатационные нужды, расхода на отопление, погрешности ее учета на электроподвижном составе в пути следования и в режиме горячего простоя и др.

Наблюдаемая в период с 2004 по 2009 г. тенденция снижения уровня небаланса электроэнергии на тягу поездов обусловлена следующими причинами.

Во-первых, в указанный период происходило внедрение на тяговых подстанциях автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). В ходе внедрения указанных систем была выполнена замена измерительных трансформаторов тока и напряжения, приборов учета электроэнергии на оборудование с более высоким классом точности. В связи с этим повысилась точность измерения количества электроэнергии, отпускаемой на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций. Обеспечен баланс приема и распределения электроэнергии по тяговым подстанциям. Кроме того, в ряде случаев была выполнена установка приборов учета

## Организация производства на транспорте

электроэнергии на границе балансовой принадлежности, что позволило более точно учитывать технологические потери в понизительных и тяговых трансформаторах тяговых подстанций, что также привело к снижению расхода электроэнергии на тягу поездов.

Во-вторых, в рассматриваемый период было проведено значительное количество научно-технических работ, направленных на повышение точности отнесения расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам электроподвижного состава границах железных дорог и участков работы локомотивных бригад с учетом взаимозаездов на смежные железные дороги.

В-третьих, в последние годы все более широкое распространение стала получать система регистрации параметров движения и автovedения (РПДА), а ее показания стали применяться для определения расхода электроэнергии по счетчикам электроподвижного состава. Это, с одной стороны, привело к увеличению удельного расхода электроэнергии по счетчикам электроподвижного состава и, с другой стороны, к снижению уровня небаланса электрической энергии на тягу поездов.

Анализ динамики потребления электрической энергии на собственные нужды тяговых подстанций в совокупности с изменением количества тяговых подстанций на сети железных дорог показал, что увеличение количества эксплуатируемых тяговых подстанций не оказывает сколько-нибудь серьезного влияния на уровень потребления электроэнергии на собственные нужды.

Основное влияние на уровень расхода электрической энергии на собственные нужды тяговых подстанций оказывает температурный фактор, так как большинство тяговые подстанции оборудованы системами электроотопления помещений, а также подогревом электрооборудования на открытой части распределительных устройств тяговых подстанций. А в летнее время значительное повышение температуры создает необходимость включения дополнительного обдува трансформаторов, что также приводит к увеличению потребления электрической энергии.

Анализ динамики потребления электроэнергии на нетяговые нужды, объема электропотребления по ОАО «Российские железные дороги» в целом и доли нетягового потребления за период 2004 – 2009 гг. показывает, что в указанный период происходило постоянное снижение как объема потребления электроэнергии на нетяговые нужды в натуральном выражении, так и его доли в общем электропотреблении в ОАО «РЖД».

Потребление электрической энергии на нетяговые нужды состоит из условно-постоянной и переменной составляющих. Условно-постоянная составляющая обусловлена наличием электрооборудования, режимы работы которого не зависят от объемов работ и носят вспомогательный характер выполнения производственно-технологического процесса. К условно-постоянной составляющей относится расход электроэнергии по следующим направлениям (группам) использования электроэнергии электрооборудования: наружное и внутреннее освещение, вентиляция и кондиционирование, электроотопление и калориферы, вычислительная и оргтехника, бытовые электроприборы.

Переменная составляющая обусловлена выполнением основного вида работ и зависит от его объема. К переменной составляющей относится расход электроэнергии по следующим направлениям (группам) использования электроэнергии электрооборудования: электропривод и станки, кузнечно-прессовое оборудование, насосы, электротермическое оборудование, подъемно-транспортные механизмы, сварочное и наплавочное оборудование; моечные машины; дробеструйные комплексы; окрасочно-сушильное оборудование, компрессоры, выпрямители, стенды и лабораторные установки, прочее оборудование.

В настоящее время отсутствует отчетная информация о структуре электрооборудования в структурных подразделениях железных дорог, дочерних и зависимых обществ ОАО «Российские железные дороги». Поэтому оценка существующей структуры электропотребления осуществлена на основании результатов энергетических обследований структурных подраз-

# Организация производства на транспорте

делений железных дорог, выполненных специалистами Омского государственного университета путей сообщения в 2007 – 2009 гг.

По результатам проведенных обследований выявлено, что соотношение условно-постоянной и переменной составляющих изменяется в широких пределах. Так, условно-постоянная составляющая может достигать 95 % для такого класса структурных подразделений, как станции, а для предприятий по ремонту подвижного состава условно-постоянная составляющая в отдельных случаях не превышает 20 %.

Обобщение имеющихся данных показало, что распределение электроэнергии между условно-постоянной и переменной составляющими расхода электроэнергии на нетяговые нужды происходит в настоящее время примерно поровну (с учетом статистической погрешности выборки), а отношение условно-постоянной и переменной составляющих электропотребления на нетяговые нужды близко к единице.

Показатель удельного энергопотребления на выпуск единицы продукции (энергоемкость продукции) является основным при оценке эффективности использования энергоресурсов.

Для структурных подразделений каждого хозяйства или дирекции ОАО «Российские железные дороги» существует своя номенклатура видов продукции или объемов эксплуатационной работы, по которой может быть выполнен расчет удельного расхода электроэнергии. При этом целесообразно выполнять расчет удельного расхода не от суммарного потребления электроэнергии, а только от потребления электроэнергии оборудованием, чей расход относится к переменной составляющей электропотребления структурного подразделения, зависящей от объема работы. Это связано с тем, что в структурном подразделении могут выполняться несколько видов работ и, соответственно, необходимо выполнять расчет удельного расхода электроэнергии раздельно по каждому из них. А использование при расчете удельного расхода электроэнергии общего электропотребления приведет к искажению результатов расчета из-за усредненного распределения по каждому значению удельного расхода условно-постоянной составляющей электропотребления.

В настоящее время на сети железных дорог отсутствует система статистической отчетности об объемах выпуска продукции (объемах выполненной эксплуатационной работы) по структурным подразделениям железных дорог, дочерним и зависимым обществам. Отсутствуют и консолидированные данные о структуре расхода электроэнергии по направлениям ее использования и разделения расхода на условно-постоянную и переменную составляющие. Это не позволяет выполнить анализ удельного расхода электрической энергии.

Одним из перспективных направлений снижения значений таких целевых показателей системы тягового электроснабжения, как удельный расход электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и небаланс, является совершенствование системы учета электроэнергии.

В настоящее время объем потребления электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций на полигоне постоянного тока определяется по приборам учета, установленным на вводах 10 кВ тяговых преобразователей, входящим в автоматизированную систему коммерческого учета электроэнергии тяговых подстанций. На полигоне переменного тока объем потребления электроэнергии на тягу поездов определяется как разность между объемом принятой электроэнергии по счетчикам, установленным на вводах 27,5 кВ, и отпущенными по счетчикам, установленным на всех присоединениях 27,5 кВ кроме фидеров контактной сети. На фидерах контактной сети приборы учета электроэнергии в абсолютном большинстве отсутствуют, а в тех случаях, когда они установлены, они подключаются через измерительные трансформаторы тока и напряжения, не соответствующие требованиям, предъявляемым к системам учета электроэнергии. Для учета электроэнергии на тягу поездов по счетчикам электроподвижного состава полигона постоянного тока в основном используются электромеханические счетчики СКВТ-Д600М класса точности 2,5 и СКВТ-Д621 класса точ-

# Организация производства на транспорте

ности 2,0. На полигоне переменного тока подвижной состав оборудован в основном счетчиками СКВТ-Ф442 класса точности 2,0. Следует отметить, что значительную погрешность в учет электроэнергии на электроподвижном составе переменного тока вносит тот факт, что напряжение на счетчик подается с обмотки собственных нужд трансформатора, а не с отдельного измерительного трансформатора.

Совершенствование системы учета электроэнергии на тягу поездов может быть реализовано по двум направлениям:

1) внедрение автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии на фидерах контактной сети (АСКУЭ ARC);

2) внедрение на электроподвижном составе автоматизированных систем учета электрической энергии, отвечающих требованиям, предъявляемым к системам коммерческого учета электрической энергии.

В этом случае, учитывая, что расчетный уровень технологических потерь электроэнергии в тяговой сети находится в диапазоне 4,4 – 8,5 %, снижение небаланса электроэнергии на тягу поездов может составить от уровня 2009 г. от 2,8 до 6,9 %.

Следует учитывать, что само по себе совершенствование систем учета электрической энергии не приводит к экономии электроэнергии. Однако повышение достоверности учета позволит организовать контроль rationalности использования электроэнергии в указанных объемах, что в свою очередь позволит, по экспертным оценкам, повысить эффективность использования «поставленной на контроль» электрической энергии на тягу поездов на 20 %, что составит 0,56 – 1,38 % от общего расхода электроэнергии на тягу поездов. Соответственно удельный расход электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций только за счет внедрения современных систем учета электрической энергии на фидерах контактной сети и электроподвижном составе снизится на 0,65 – 1,6 кВт·ч на 10000 ткм брутто.

Снижение значения расхода электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций может быть достигнуто в основном путем внедрения современных систем освещения, отопления и вентиляции зданий тяговых подстанций, а также перспективных микропроцессорных систем управления, автоматики и телемеханики.

Снижение значений целевых показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности на нетяговые нужды может быть достигнуто за счет уменьшения потребления электроэнергии электрооборудованием по направлениям ее использования.

При этом в сегменте условно-постоянной составляющей расхода электроэнергии на нетяговые нужды основного снижения электропотребления можно добиться за счет замены ламп накаливания и газоразрядных ламп на светодиодные источники света, что позволит снизить расход электроэнергии на освещение в пять – восемь раз. Учитывая, что доля расхода электроэнергии на освещение в общем электропотреблении на нетяговые нужды составляет около 23 %, ожидаемая экономия электроэнергии может составить от 18,7 до 20,5 % от общего потребления на нетяговые нужды.

Ожидать существенного снижения потребления электроэнергии по остальным направлениям использования электроэнергии, относящимся к условно-постоянной составляющей, не приходится, так как в последние годы происходит массовое внедрение современных систем кондиционирования и вентиляции воздуха, систем электроотопления, а также вычислительной техники.

В сегменте переменной составляющей электропотребления на нетяговые нужды более 80 % расхода электроэнергии приходится на станки, насосы, электротермическое, сварочное и наплавочное оборудование, компрессоры и прочее производственное оборудование.

Одним из перспективных направлений снижения расхода электроэнергии, которое находит все более широкое применение, является внедрение частотно-регулируемого привода компрессоров и насосов. В области электротермической обработки все большее распространение

## Организация производства на транспорте

нение получают комбинированные системы нагрева (индукционный, с использованием других энергоресурсов и пр.), вакуумные электропечи, системы автоматического управления электротермической обработкой.

Эти и другие технические решения в совокупности с заменой электрооборудования избыточной мощности и проведением организационных мероприятий, направленных на обеспечение рациональности использования электроэнергии, позволят в перспективе получить снижение расхода электроэнергии на нетяговые нужды по переменной составляющей от 6,2 до 15,8 %.

Соответственно суммарное снижение расхода электроэнергии на нетяговые нужды может составить от 24,9 до 36,3 % от текущего потребления электроэнергии на нетяговые нужды при существующем объеме выполняемой ремонтно-эксплуатационной работы.

Определение конкретных мероприятий по улучшению целевых показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности возможно в ходе проведения обязательных энергетических обследований, которые в соответствии с действующим законодательством должны быть завершены в ОАО «Российские железные дороги» в 2012 г.

В ходе проведения энергетических обследований должны быть составлены энергетические паспорта структурных подразделений железных дорог, дирекций и иных филиалов ОАО «Российские железные дороги», подготовлены программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности для каждого структурного подразделения, а также комплексные программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности железнодорожных узлов.

# АННОТАЦИИ

УДК 629.424.3:621.436.03.001.42

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРОЙ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЕ ДЕТАЛЕЙ

### **Блинов Павел Николаевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Декан теплоэнергетического факультета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент.

Тел.: (3812)-31-04-09.

E-mail: blinovpn@omgups.ru

### **Блинов Александр Павлович**

Локомотивное мотор-вагонное депо Омск.

Электромеханик.

Тел.: (3812)-76-19-28.

E-mail: blinovap@mail.ru

*В статье рассматриваются параметры топливной аппаратуры дизелей, влияющие на неравномерность топливоподачи по цилиндрам. Предложена математическая модель процесса топливоподачи, которую необходимо применять при формировании комплектов перед их установкой на дизель и для расчета параметров деталей, используемых при обкатке топливных насосов высокого давления на стендах с целью приближения условий работы на стенде к реальным условиям работы на дизеле и правильного определения производительности насосов на стенде.*

**Ключевые слова:** дизели, топливная аппаратура, топливный насос высокого давления, нагнетательный трубопровод, форсунка, производительность насоса, гидравлическое сопротивление, модель процесса топливоподачи, стенды.

## MODEL OF THE PROCESS OF FUEL FEED BY LOCOMOTIVE DIESEL FUEL EQUIPMENT TAKING INTO ACCOUNT THE TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ITS COMPONENTS

### **Blinov Pavel Nikolayevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The Dean of chair «Heat power», Cand. Tech. Sci., the senior scientific employee, the senior lecturer.

Phone: (3812)-31-04-09.

E-mail: blinovpn@omgups.ru

### **Blinov Alexander Pavlovich**

Locomotive motorcarload depot Omsk.

The electromechanic.

Phone: (3812)-76-19-28.

E-mail: blinovap@mail.ru

# АННОТАЦИИ

In the article the parameters of fuel equipment of diesels, which influence the nonuniformity of fuel feed on the cylinders, are examined. Is proposed the mathematical model of the process of fuel feed, which must be used with the formation of the complete sets before their installation to the diesel and for calculating the parameters of components, utilized with the running-in of fuel high-pressure pumps on the stands for the purpose of the approximation of the working conditions on stand to actual conditions for work on the diesel and the correct determination of the pump capacity on the stand.

Keywords: diesels, fuel equipment, fuel high-pressure pump, pressure line, sprayer, the pump capacity, hydraulic resistance, the model of the process of fuel feed, stands.

УДК 621.833.1

## ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА ТЕПЛОВОЗА

### Бородин Анатолий Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теория механизмов и детали машин».

Тел.: (3812) 31-06-18.

E-mail: tmdm@omgups.ru

### Тарута Дмитрий Викторович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и детали машин», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-18.

E-mail: tmdm@omgups.ru

### Вельгодская Татьяна Владимировна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и детали машин», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-18.

E-mail: tmdm@omgups.ru

Приводятся результаты исследования влияния кольцевых прорезей на несущую способность зубчатой передачи тягового редуктора локомотива.

Ключевые слова: зубчатое колесо, поверхность контакта, несущая способность.

## INCREASE BEARING ABILITY OF TOOTH GEARING OF A TRACTION REDUCER OF THE LOCOMOTIVE

### Borodin Anatoly Vasilievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr.Sci.Tech., professor, head of chair «Theory of mechanisms and machine elements».

Phone: (3812) 31-06-18.

E-mail: tmdm@omgups.ru

# АННОТАЦИИ

## **Taruta Dmitry Viktorovich**

Cand.Tech.Sci. the senior lecturer of chair «Theory of mechanisms and machine elements», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-18.

E-mail: tmdm@omgups.ru

## **Velgodskay Tatiana Vladimirovna**

Cand.Tech.Sci. the senior lecturer of chair «Theory of mechanisms and machine elements», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-18.

E-mail: tmdm@omgups.ru

*Results of bench researches of influence of ring flutes of small width on bearing ability of a tooth gearing of a traction reducer of the locomotive are resulted at skews of axes of wheels.*

Keywords: *a cogwheel, the surface of contact, bearing ability.*

УДК 629.424.1:502.1

## **ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВА И ТОПЛИВНЫХ ПРИСАДОК НА ПАРАМЕТРЫ ДИЗЕЛЯ**

### **Гришина Юлия Борисовна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Локомотивы».

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: gubuly@mail.ru

### **Михеев Вячеслав Александрович**

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

### **Анисимов Александр Сергеевич**

Доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

*Задача снижения выбросов вредных веществ тепловозными дизелями может быть решена только комплексом мероприятий, направленных на совершенствование конструкции дизеля, системы технического обслуживания и ремонта дизелей, учет условий эксплуатации, повышение качества дизельного топлива и масла, создание многофункциональных присадок к дизельному топливу, применение альтернативных видов топлива.*

Ключевые слова: *дизельное топливо, отработавшие газы, присадка, вредные выбросы, сажа, углеводороды, экология.*

## **INFLUENCE OF CHARACTERISTICS OF FUEL AND FUEL ADDITIVES ON PARAMETERS OF A DIESEL ENGINE**

### **Grishina Julia Borisovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

# АННОТАЦИИ

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.  
Postgraduate student of chair «Locomotives».  
Phone: 007-3812-313417.  
E-mail: gubuly@mail.ru

**Mikheyev Vyacheslav Aleksandrovich**  
Postgraduate student of chair «Locomotives», OSTU.  
Phone: 007-3812-313417.

**Anisimov Alexander Sergeevich**  
The senior lecturer of chair «Locomotives», OSTU.  
Phone: 007-3812-313417.

*The Problem of decrease in emissions of harmful substances diesel engines can be solved only by a complex of the actions directed on perfection of a design of a diesel engine, system of maintenance service and repair of diesel engines, the account of conditions of operation, improvement of quality of diesel fuel and oil, creation of multipurpose additives to diesel fuel, application of alternative kinds of fuel.*

Keywords: *The diesel fuel, the fulfilled gases, an additive, harmful emissions, soot, hydrocarbons, ecology.*

УДК 629.42.07

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОГО РЕГИСТРАТОРА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

**Климович Андрей Владимирович**  
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и механика».  
Тел.: (3812) 31-18-66.  
E-mail: glumli@list.ru

**Кообар Александр Александрович**  
Преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ОмГУПС.  
E-mail: koobar\_a\_a@mail.ru

**Лендысов Алексей Сергеевич**  
Инженер кафедры «Прикладная математика и механика», ОмГУПС.  
Тел.: (3812) 31-18-66.  
E-mail: LendysovAS@mail.ru

*В статье предлагается методика определения удельного сопротивления движению поезда в выполненной поездке по данным электронного регистратора параметров движения, основанная на математической обработке графика движения  $v = f(s)$ . Практическое использование данной методики показало, что действительное удельное сопротивление движению грузовых поездов меньше рассчитанных по действующим Правилам тяговых расчетов примерно на 17 – 20 %.*

# АННОТАЦИИ

Ключевые слова: *удельное сопротивление движению поезда, электронный регистратор параметров движения, график движения, математическая обработка графика движения.*

## THE METHOD OF THE DETERMINATION OF THE RESISTANCE TO MOVING THE TRAIN AS OF ELECTRONIC RECORDER PARAMETER MOTION

### Klimovich Andrey Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Msrx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Applied mathematics and mechanics».

Phone: (3812) 31-18-66.

E-mail: glumli@list.ru

### Koobar Alexander Alexandrovich

The teacher of chair «Safety of ability to live and ecology», OSTU.

E-mail: koobar\_a\_a@mail.ru

### Lendyasov Aleksey Sergeevich

Engineer of chair «Applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-66.

E-mail: LendyasovAS@mail.ru

*It is offered method of the determination of resistivity to moving the train in executed trip as of electronic recorder parameter motion, founded on mathematical processing graphics motion  $v = f(s)$ . His practical use has shown that real resistivity to moving the freight trains less calculated on acting Rule tractive calculation approximately on 17 – 20 %.*

Keywords: *specific resistance to train movement, the electronic registrar of parametres of movement, the train diagramme, mathematical processing of the train diagramme.*

УДК 621.336.574

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКОПРИЕМНИКОВ МОНОРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

### 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.: 8(381-2) 31-34-46.

E-mail: sidorovo@omgups.ru

### Маркелова Ксения Сергеевна

Преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел. 8(381-2)31-34-46, 41-88, 8-904-321-94-51.

E-mail: k.s.dudareva@mail.ru

# АННОТАЦИИ

## Мусаткина Бэла Владимировна

Старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»,  
ОмГУПС.

Тел.: 8(381-2) 31-18-33.

E-mail: iovv@mail.ru

*Наиболее значимым фактором в общем химическом загрязнении городской среды устройствами токосъема монорельсового транспорта является повышенная концентрация в воздухе мелкодисперсных компонентов износа контактных элементов. Прогноз количества поступления продуктов износа в окружающую среду осуществлен на основе результатов экспериментальных исследований контактных пар в Омском государственном университете путей сообщения. Ожидаемые величины концентраций загрязняющих веществ определены по нормативному документу ОНД-86 «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий». Полученные результаты могут быть использованы для оценки риска химического загрязнения среды обитания. Авторами предложена полезная модель токоприемника транспортного средства с улучшенными экологическими характеристиками, позволяющая снизить вынос продуктов износа контактных элементов в окружающую среду.*

Ключевые слова: окружающая среда, химическое загрязнение, монорельсовый транспорт, устройства токосъема электрического транспорта.

## RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF CURRENT COLLECTORS MONORAIL TRANSPORT

### Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr.Sci.Tech., the professor, the manager-blowing chair «railway transportation Electrical supply»

Phone: 8 (381-2) 31-34-46.

E-mail: sidorovo@omgups.ru

### Markelov Xenia Sergeevna

The teacher of chair «Elektrosnabzhenie of a railway transportation», OSTU.

Phone: 8 (381-2) 31-34-46, 41-88, 8-904-321-94-51.

E-mail: k.s.dudareva@mail.ru

### Musatkina Bela Vladimirovna

The senior teacher of chair «Without-pasnost ability to live and ecology», OSTU.

Phone: 8 (381-2) 31-18-33.

E-mail: iovv@mail.ru

*The most significant factor in the general chemical pollution of the city environment by current collection devices monorail transport is the raised concentration in air small disperse components of deterioration of contact elements. The forecast of quantity of receipt of products of deterioration in environment is carried out on the basis of results of experimental researches of contact pairs in laboratory «Contact networks and electric mains» by Omsk State Transport University. Expected sizes of concentration of polluting substances are defined under standard document «the Design procedure of concentration in atmospheric air of the harmful substances containing in emissions of*

# АННОТАЦИИ

*the enterprises». The received results can be used for an estimation of risk of chemical pollution of an inhabitancy. Authors offer useful model of a current collector of a vehicle with the improved ecological characteristics, allowing to lower carrying out of products of deterioration of contact elements in environment.*

**Keywords:** *in article the approach to modeling functional systems of a diesel locomotive engine based on use of the graph theory device is considered. Results of stage-by-stage modeling of pressurization system of a diesel locomotive engine are presented.*

УДК 621. 436.001.5

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ ПД1М И 1-ПД4Д В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

### **Сквородников Евгений Иванович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы».

Тел.: (3812) 31-34-17.

### **Лифанов Максим Викторович**

ОАО «Научно-исследовательский институт технологии контроля и диагностики железнодорожного транспорта».

644005, г. Омск, ул. Избышева, д. 3, корп. 2.

Ведущий инженер.

Тел.: (3812)45-40-14.

E-mail: mvlifanov@mail.ru

### **Анисимов Александр Сергеевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

*В статье рассмотрено влияние конструктивных решений, реализованных при создании дизеля 1-ПД4Д, на показатели его надежности. Представлены сравнительный анализ параметров топливоподачи дизелей ПД1М и 1-ПД4Д и анализ причин выхода из строя подшипников коленчатого вала.*

**Ключевые слова:** *дизель-генератор, надежность, подшипник скольжения, кинематическая вязкость, моторное масло, характеристика вспышки, тепловой расчет.*

## THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE OVERALL PERFORMANCE DIESEL ENGINES ПД1М AND 1-PD4D UNDER OPERATING CONDITIONS

### **Skvorodnikov Evgenie Ivanovich**

Omsk state university of means of communication.

644046, Omsk, Marx's avenue, 35.

Dr.Sci.Tech., the professor of chair «Locomotives».

Phone: (3812) 31-34-17.

# АННОТАЦИИ

## Lifanov Maxim Viktorovich

Open Society «Scientific research institute of technology of the control and diagnostics of glands-nodorozhnogo of transport».

644005, Omsk, street Izbysheva, д. 3, a building 2.

The leading engineer

Phone: (3812) 45-40-14.

E-mail: mvlifanov@mail.ru

## Anisimov Alexander Sergeevich

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

*In article influence of the constructive decisions realised at creation of a diesel engine 1-PD4D on indicators of its reliability is considered. The comparative analysis of para-metres топливоподачи diesel engines ПД1М and 1-PD4D and the reasons of failure of bearings to-lenchatogo a shaft is presented.*

Keywords: a diesel engine-generator, reliability, the sliding bearing, kinematiche-skaja viscosity, engine oil, the characteristic of injection, thermal calculation.

УДК 662.61.502.36

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАК ВАЖНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

## Ведрученко Виктор Родионович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика».

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

## Крайнов Василий Васильевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

## Кокшаров Максим Валерьевич

Старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

*Выполнен анализ разведанных запасов основных энергетических ресурсов (нефти и газа) на перспективу до 2030 г. в разных странах мира и прогноз добычи угля, нефти и газа в России до 2020 г. Приведены приближенная оценка эффективности инженерно-технических мероприятий для котельных малой мощности и некоторые результаты испытаний котлов фирмы «Октан» на газе.*

Ключевые слова: ресурсы, прогноз, добыча, теплоэнергетика, экономичность, контроль

# АННОТАЦИИ

## THE TEPLOTEHNICHESKY CONTROL AS THE IMPORTANT DIRECTION IN ECONOMY OF FUEL IN BOILER INSTALLATIONS OF THE RAILWAY TRANSPORTATION

### **Vedruchenko Victor Rodionovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr.Sci.Tech., professor of chair «Power system».

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

### **Krajnov Vasily Vasilevich**

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

### **Koksharov Maxim Valerevich**

The senior teacher of chair «Power system», OSTU.

Ph.: (3812) 31-06-23.

*The analysis of the reconnoitered stocks of the basic power resources is made: oil and gas on prospect till 2030 in the different countries of the world and the forecast of a coal mining, oil and gas in Russia to 2020. The approached estimation of efficiency of technical actions for low power boiler-houses is resulted; some results of tests of coppers of firm «Octan» on gas are resulted.*

Keywords: resources, the forecast, extraction, power system, profitability, the control.

УДК 624.332:621.316.97

## ПАРАМЕТРЫ ИЗОЛИРОВАННОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

### **Ерита Александр Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Системы передачи информации».

Тел.: (3812)31-06-94.

### **Кандаев Василий Андреевич**

Доктор технических наук, профессор «Системы передачи информации», ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

E-mail: kandaev\_va@mail.ru

### **Авдеева Ксения Васильевна**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

E-mail: avdeeva\_kv@mail.ru

*В статье определены параметры изолированного цилиндрического проводника в однородной среде.*

# АННОТАЦИИ

Ключевые слова: *волновое сопротивление, изолированный проводник, однородная среда, постоянная распространения, собственные параметры, электромагнитное поле.*

## **Erita Aleksander Mihailovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The postgraduate student of chair «Information transmission systems», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

## **Kandaev Vasilii Andreevich**

Dr.Sci.Tech., professor of chair «Information transmission systems», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

E-mail: kandaev\_va@mail.ru

## **Avdeeva Ksenia Vasiilevna**

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Information transmission systems», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

E-mail: avdeeva\_kv@mail.ru

*In article parameters of the isolated cylindrical conductor in the one-native environment are defined.*

Keywords: *the wave resistance, the isolated conductor, odes-norodnaja environment, constant distributions, own parameters, elek-tromagnitnoe a field.*

УДК 621.1.016.536.25

## **УЧЕТ ЭНЕРГОСУРСОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ АСКУЭ**

### **Казачков Владимир Семенович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

Тел.: (3812) 31-06-88.

### **Когут Станислав Алексеевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления»,  
ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

*В статье рассматривается автоматизированная комплексная система учета энергоресурсов (АСКУЭ), разработанная авторами, позволяющая вести учет различных ресурсов на основе уравнения баланса, связывающего измерения, произведенные приборами коммерческого учета для предприятия в целом, и показания приборов технического учета на отдельных объектах. Дается описание оригинальной методики учета тепловой энергии с помощью косвенных измерений, приведены сведения об аппаратной реализации АСКУЭ и экономическом эффекте от ее внедрения.*

# АННОТАЦИИ

Ключевые слова: автоматизированная система, учет энергоресурсов, баланс, экономическая эффективность.

## THE ACCOUNT OF POWER RESOURCES AT THE ENTERPRISES RAILWAY TRANSPORTATION ON THE BASIS OF ACKУЭ

### Kazachkov Vladimir Semenovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer».

Phone: (3812 31-06-88.

### Kogut Stanislav Alekseevich

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Automatics and control systems», the Ohm-gups.

Phone: (3812 31-05-89.

*In article the automated complex system of the account of power resources (ACKУЭ), developed by the authors is considered, allowing to keep account various resources on the basis of the balance equation, svjazy-vajushchego the measurements made by devices of the commercial account for the enterprise as a whole and the indication at-hog the technical account on separate objects. The description of an original technique of the account of thermal energy by means of indirect measurements is given, data on hardware realisation ACKУЭ and ekonomiche-skom effect from its introduction are resulted.*

Keywords: the automated system, the account of power resources, balance, economic efficiency.

УДК 658.26:656.2:519:673

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СРЕДНЕГО РЕМОНТА ЭЛЕКТРОВОЗОВ

### Пашков Денис Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: 8-906-918-66-55, (3812)53-12-64.

E-mail: PashkovDV@omgups.ru

### Пономарев Антон Витальевич

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: 8-923-693-20-84, (3812)40-05-31.

E-mail: antony-mps@mail.ru

*В статье рассматриваются некоторые особенности моделирования электропотребления технологического процесса. В качестве примера взят технологический процесс среднего ремонта электровозов в локомотивных ремонтных депо. Рассмотрен алгоритм построения имитационных моделей, адаптированный к описанию технологических процессов ремонта подвижного состава.*

# АННОТАЦИИ

Ключевые слова: *технологический процесс, ремонт подвижного состава, метод определения расхода электрической энергии, имитационное моделирование, средний ремонт электровозов.*

## SOME FEATURES OF MODELLING POWER CONSUMPTION OF TECHNOLOGICAL PROCESS AVERAGE REPAIR OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

### Pashkov Denis

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: 8-906-918-66-55, (3812)53-12-64.

E-mail: PashkovDV@omgups.ru.

### Ponomaryov Anton

The teacher of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: 8-923-693-20-84, (3812)41-23-02.

E-mail: antony-mps@mail.ru

*In this article some features of electric power consumption modeling for the technologic processes are considered. As an example the technologic process of electric locomotive mid-life repair in a locomotive depot is taken. There is algorithm of imitation model construction which is adapted to define rolling stock repair technologic processes.*

Keywords: *Technological process, rolling stock repair, method of electric power expenditure calculation, simulation modeling, locomotive mid-life repair.*

УДК 621.316

## ПРОБЛЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТОВЕРНОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В «ГОРЯЧЕМ» ПРОСТОЕ ЛОКОМОТИВОВ ПРИ ДЕПО И ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ПРИЧАСТНЫМ БИЗНЕС-ЕДИНИЦАМ

### Ушаков Сергей Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, инженер научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость».

Тел.: 8-905-943-67-76.

E-mail: rusadmiral@mail.ru

### Гутников Вячеслав Иванович

Старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: 8-3812-44-39-23.

### Ларин Андрей Николаевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: 8-908-310-78-60.

# АННОТАЦИИ

E-mail: larinan75@mail.ru

*В статье представлены экспериментальные исследования расхода электрической энергии на электровозах в «горячем» простое при депо и способ разделения его по причастным бизнес-единицам.*

*Ключевые слова: «горячий» простой, бизнес-единица, непроизводительный расход, ожидание работы, локомотив, вспомогательные машины.*

## PROBLEM OF THE ORGANIZATION OF THE AUTHENTIC ACCOUNT OF ELECTRIC ENERGY IN «HOT» IDLE TIME OF LOCOMOTIVES AT DEPOT AND ITS DISTRIBUTIONS ON INVOLVED BUSINESS UNITS

**Ushakov Sergey Jurevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marks av., Omsk, 644046.

Cand.Tech.Sci., the engineer of research-and-production laboratory «Power-saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: 8-905-943-67-76.

E-mail: rusadmiral@mail.ru

**Gutnikov Vyacheslav Ivanovich**

The senior researcher of research-and-production laboratory «Power-saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: 8-3812-44-39-23.

**Larin Andrey Nikolaevich**

Cand.Tech.Sci., the senior researcher of research-and-production laboratory «Power-saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: 8-908-310-78-60.

E-mail: larinan75@mail.ru

*In article are presented experimental researches of the expense of electric energy on electric locomotives in «hot» idle time under depot and a way of its division on involved business units are presented.*

*Keywords: «hot» idle time, business unit, the unproductive expense, work expectation, the locomotive, auxiliary cars.*

УДК 621.332.23:519.17:656.25:512.62:681.5

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Лунев Сергей Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика».

Тел. 8-3812-31-06-83.

E-mail: LunevSA@omgups.ru

# АННОТАЦИИ

**Борисенко Дмитрий Владимирович**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел. 7-904-327-0909.

E-mail: BorisenkoDV@omgups.ru

**Аюпов Роман Шамильевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел. 7-908-800-7349.

E-mail: AyupovRSh@omgups.ru

*В статье рассмотрены теоретические направления, перспективные с точки зрения автоматизации управления технологическими процессами и проектирования технологических комплексов на железнодорожном транспорте.*

*Ключевые слова: тяговая рельсовая сеть, аппарат конформных отображений, нейронная сеть, теория графов, контроль качества электроэнергии, управление электропитанием, метод математической индукции, нечеткая логика.*

## PERSPECTIVE METHODS OF DESIGNING AND MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES ON THE RAILWAY TRANSPORTATION

**Lunev Sergey Alexandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., head of chair «Automatics and telemechanics».

Phone: 8-3812-31-06-83.

E-mail: LunevSA@omgups.ru

**Borisenko Dmitriy Vladimirovich**

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: 7-904-327-0909.

E-mail: BorisenkoDV@omgups.ru

**Ayupov Roman Shamilevich**

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: 7-908-800-7349.

E-mail: AyupovRSh@omgups.ru

*In this article is considered the promising theoretical direction from the viewpoint of workflow control automation and technological system projection for the railway transport.*

*Keywords: running of return traction current, conformal transformation apparatus, neural network, graph theory, electricity quality control, power supply control, mathematical induction method, fuzzy logic.*

# АННОТАЦИИ

УДК 656.25+621.396.9

## АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

**Любченко Александр Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Радиотехнические и управляющие системы».

Тел.: (3812) 37-68-33.

E-mail: lyubchenko@mail.ru

*В статье приведены возможные варианты структуры системы определения местоположения подвижной единицы (СОМП) на основе Глобальной навигационной спутниковой системы, полученные в результате анализа зарубежных проектов по исследованию возможности применения спутниковой навигации на железнодорожном транспорте, а также представлены требования, предъявляемые к СОМП со стороны железнодорожного сектора для различных областей применения.*

**Ключевые слова:** Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), Глонасс, GPS, подвижной состав, местоположение, горизонтальная точность, риск целостности, интегральный уровень безопасности.

## ANALYSIS OF GNSS-BASED FACILITY STRUCTURE FOR IDENTIFICATION OF ROLLING STOCK LOCATION

**Lyubchenko Alexander Alexandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of chair «Radio and control systems».

Phone: (3812) 37-68-33.

E-mail: lyubchenko@mail.ru

*In the article possible variants of GNSS-based facility structure for locomotive location identification (GFLI) are presented, which were derived pending the analysis of European projects devoted to survey of application possibility of satellite navigation in railway. Moreover, requirements producible to GFLI from railway sector for various fields of use are outlined.*

**Keywords:** Global Navigation Satellite System (GNSS), GLONASS, GPS, rolling stock, location, horizontal accuracy, integrity risk, safety integrity level.

УДК 004.31

## ОГРАНИЧЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ

**Сидоренко Андрей Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.

Тел. 7-913-640-6948.

E-mail: andrey.s.sidorenko@gmail.com

# АННОТАЦИИ

*В статье проанализирована возможность параллельного вычисления быстрого преобразования Фурье на нескольких процессорах. Сделаны замечания, играющие важную роль при распараллеливании вычислений. Кроме того, рассмотрены условия, при соблюдении которых можно получить наибольшую производительность системы.*

*Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, сигнальный процессор, разрядность, трафик.*

## PECULIARITY OF PARALLEL COMPUTING OF FAST FOURIER TRANSFORM

**Sidorenko Andrey Sergeevitch**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The postgraduate student of chair «Information transmission systems».

Phone: 7-913-640-6948.

E-mail: andrey.s.sidorenko@gmail.com

*This paper presents an analysis of parallel computing of fast Fourier transform for several digital signal processors. Here are some important remarks for parallel computing. Furthermore shows conditions, observance of which let as maximum performance of system.*

*Keywords: fast Fourier transform, digital signal processor, capacity, traffic.*

УДК 621.3.083.92

## КОМПЕНСАЦИЯ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ В СЧЕТЧИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Хряков Александр Анатольевич**

Омский Государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант, ведущий инженер отдела «Нанотехнологии».

Тел. 77-80-28.

Email: alexomskh@yandex.ru

*В статье рассматриваются основные проблемы измерения постоянного тока в счетчиках электрической энергии, анализируются причины, приводящие к снижению точности измерений, приводятся методы их устранения. Рассматривается метод повышения точности измерений с применением системы коррекции смещения нуля в реальном масштабе времени.*

*Ключевые слова: дрейф нуля, сигма-дельта АЦП, инструментальный усилитель.*

## INDEMNIFICATION OF DISPLACEMENT OF ZERO IN COUNTERS OF ELECTRIC ENERGY OF THE DIRECT CURRENT

**Khryakov Alexandre Anatolyevich,**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Graduate, leading engineer of the Omsk State Transport University «Nanotechnology» department.

Phone: 77-80-28.

Email: alexomskh@yandex.ru

# АННОТАЦИИ

The article describes the basic problems of direct current measurement in electric power meters. Leading causes of accurate measurements degradation are analyzed. Methods for their removal are presented. The method for improving the accuracy of measurements with zero offset correction system in real time is considered.

Keywords: *zero drift, sigma-delta ADC, instrumentation amplifier.*

УДК 656.223

## ИННОВАЦИОННЫЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ МЕТРОПОЛИТЕНОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

### Сафронов Эдуард Алексеевич

ГОУ ВПО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия» (СибАДИ).  
644080, Омск, пр. Мира, 5.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Городское строительство и хозяйство». Тел.: (3812) 77-11-37.

E-mail: sibadi1@rambler.ru

### Сафронов Кирилл Эдуардович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство», СибАДИ.

Тел.: (3812) 74-75-53.

E-mail: transistem@rambler.ru

### Семенова Екатерина Сергеевна

Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Маркетинг», СибАДИ.

Тел.: (3812) 65-01-45.

E-mail: essemeyonova@rambler.ru

*Рассматриваются инновационные пути развития метрополитенов в городах России с учетом зарубежного опыта. Предлагаются пути ускорения строительства, снижения капитальных вложений и себестоимости перевозок. Приводятся результаты расчетов потребности в подвижном составе нового типа для г. Омска на 2016 и 2025 гг.*

Ключевые слова: *метрополитен, инновационные технологии, подвижной состав, вместимость, интервал движения, эффективность, доступность станций.*

## INNOVATIVE WAY OF DEVELOPMENT OF UNDERGROUNDS TO THE MODERN CONDITIONS

### Safronov Edward Alekseevich

Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI).

5, prospect Mira, Omsk, 644080, Russia.

Dr.Sci.Tech., professor of chair «Urban construction and facilities».

Phone: (3812) 77-11-37.

E-mail: sibadi1@rambler.ru

### Safronov Cyril Eduardovich

Cand.Tech.Sci. the senior lecturer of chair «Urban construction and facilities», SibADI.

Phone: (3812) 74-75-53.

E-mail: transistem@rambler.ru

# АННОТАЦИИ

**Semenova Ekaterina Sergeevna**

Cand.Tech.Sci. the senior lecturer of chair «Marketing», SibADI.

Phone: (3812) 65-01-45.

E-mail: essemyonova@rambler.ru

*Innovative ways of development of undergrounds to cities of the Russian Federation taking into account foreign experience are considered. Ways of acceleration of building, decrease in capital investments and the cost price of transportations are offered. Results of calculations of requirement for a rolling stock of new type for Omsk on 2016 and are resulted 2025.*

**Keywords:** *underground, innovative technologies, a rolling stock, capacity, a movement interval, efficiency, availability of stations.*

УДК 620.9:005.93:502.174

## **ЦЕЛЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА НЕТЯГОВЫЕ НУЖДЫ**

**Никифоров Михаил Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость».

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

*В статье предложены целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения железных дорог и целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности использования электроэнергии на нетяговые нужды. Даны оценка перспектив снижения значений предложенных целевых показателей.*

**Ключевые слова:** *электрическая энергия, энергосбережение, энергоэффективность, целевые показатели, система тягового электроснабжения, нетяговые нужды, удельный расход.*

## **TARGET INDICATORS OF POWER SAVINGS AND INCREASE OF POWER SYSTEM EFFECTIVENESS OF THE TRACTION ELECTRICAL SUPPLY AND POWER CONSUMPTION FOR NOT TRACTION NEEDS**

**Nikiforov Michael Mihajlovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., the chief of research-and-production laboratory «Power-saving up technologies and electromagnetic compatibility».

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

*In article target indicators of power savings and increase power effek-tivnosti systems of a traction electrical supply of the railways and target indicators of power savings and increase of power efficiency of use of the electric power for not traction needs are offered. The estimation of prospects of decrease in values of the offered target indicators is given.*

**Keywords:** *electric energy; power savings; power efficiency; tsele-vye indicators; system of a traction electrical supply; not traction needs; the specific expense.*

## **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 ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Комяковой Ольге Олеговне 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 предоставляются:**

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);  
Сафонов Эдуард Алексеевич – д.т.н., СибАДИ (Омск);  
Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Сидорова Елена Анатольевна – д.т.н., ОмГУПС (Омск);  
Сквородников 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 – Комякова О. О.

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.

Адрес редакции: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;  
тел./факс: (3812) 31-05-54; e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 10.09.2010.

Тираж 500 экз.



**НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ  
ТРАНСПОРТНЫХ ВУЗОВ  
«ТРАНСВУЗ-2010»**

Посвящается 110-летию  
Омского государственного университета путей сообщения

**15, 16 декабря 2010 г.  
Омск**

**Информационное сообщение**

В рамках форума будет проведена международная научно-техническая конференция «Иновации для транспорта». На конференции планируется рассмотреть инновации на транспорте на следующих секциях:

- 1) системы управления и обеспечения безопасности движения поездов; развитие средств технического диагностирования;
- 2) совершенствование технологии ремонта и повышение надежности подвижного состава; совершенствование работы систем электроснабжения железных дорог;
- 3) автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте; совершенствование инфраструктуры и технических средств железных дорог для обеспечения высокоскоростного движения;
- 4) ресурсо- и энергосбережение;
- 5) информационно-телекоммуникационные технологии и информационная безопасность;
- 6) экономика и управление;
- 7) системы управления перевозочным процессом и транспортная логистика;
- 8) наноматериалы и нанотехнологии;
- 9) безопасность жизнедеятельности: охрана труда, инженерная защита окружающей среды; образование.

К участию приглашаются профессорско-преподавательский состав вузов, руководители и специалисты транспорта и промышленности отечественных и зарубежных компаний.

Требования к оформлению докладов опубликованы на сайте ОмГУПСа.

**Адрес оргкомитета:**

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, Омский государственный университет путей сообщения, научно-исследовательская часть.

E-mail: nich@omgups.ru; nauka@omgups.ru

Для справок:

тел./факс: (3812) 31-16-27 – Курзюкова Ольга Николаевна.