ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 4(4)
2010

ИЗВЕСТИЯ Транссиба
научно-технический журнал
№ 4(4) 2010
Периодичность - 4 выпуска в год

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. **Косых 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

Балагин О. В., Чулков А. В., Балагин Д. В. Математическая модель процесса технической эксплуатации дизельных локомотивов....2
Белан Д. Ю., Лузин В. М. Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей....6
Бородин А. В., Тарута Д. В. Совершенствование конструкции моторно-осевого узла колесно-моторного блока локомотива....12
Кузнецов А. А., Мешкова О. Б. Внутрилабораторный контроль точности результатов спектрального анализа с применением контрольных карт....16
Матяш Ю. И., Томилова О. С. Устройство для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования....23
Сковородников Е. И., Анисимов А. С., Гришина Ю. Б. Влияние параметров выгорания топлива на эффективность рабочего цикла дизеля....27
Смалев А. Н. Сравнительный анализ математических моделей вертикальной динамики экипажа....32

Транспортная энергетика

Ведрученко В. Р., Жданов Н. В. Особенности температурного режима дымовой трубы блочной автоматизированной котельной, работающей на природном газе....40
Ибрагимова О. А., Лебедев В. М. Направления совершенствования работы существующих источников тепла....44
Каштанов А. Л., Ларин А. Н., Пономарев А. В. Оценка эффективности использования УСАВП в грузовом движении....49
Комякова О. О., Комякова Т. В. Гармонический анализ сетевого тока преобразователя, работающего в инверторном режиме, при несимметричном несинусоидальном напряжении питающей сети....55
Кондратьев Ю. В., Привалов С. Я. Совершенствование метода расчета параметров и выбора мест установки устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности в условиях применения рекуперативного торможения и протекания уравнительных токов....63
Парамонов А. М., Резанов Е. М., Кушнаренко А. В. Повышение эффективности энергосбережения при работе нагревательных печей....68
Сидорова Е. А., Давыдов А. И. Характеристика энергопотребления на тягу поездов в энергетическом паспорте железной дороги....76
Тарута М. В., Финиченко А. Ю. Использование теплонасосных установок для нужд потребителей....80
Третьяков Е. А., Малышева Н. Н., Краузе А. В. Оптимизация структуры компенсирующих устройств....85
Чижма С. Н. Составляющие мощности при несинусоидальных и несимметричных режимах работы систем электроснабжения железных дорог....94

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Альтман Е. А., Елизаров Д. А. Исследование методов определения частоты однотонального сигнала....103
Тарасов Е. М. Принцип многоканальности в задачах классификации состояний рельсовых линий.... 111

Организация производства на транспорте

Молчанов В. В., Шахов В. Г. Новые технологии и оборудование контроля и диагностирования железнодорожной техники....116
Никифоров М. М. Концепция организации энергетического обследования ОАО «Российские железные дороги»....120
Усманов Ю. А., Булахова Ю. В. Совершенствование менеджмента ОАО «РЖД» с учетом положений международных стандартов качества....127

АННОТАЦИИ 135

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»
Учредитель: Омский государственный университет путей сообщения
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35
Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

УДК 629.424.1

О. В. Балагин, А. В. Чулков, Д. В. Балагин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

В статье рассматривается математическая модель процесса технической эксплуатации дизельного локомотива, учитывающая изменение внешних условий, техническое состояние, режимы работы дизель-генераторных установок в реальных условиях эксплуатации локомотивов и их влияние на расход топлива.

Техническая эксплуатация дизельных локомотивов включает в себя большой и разнообразный комплекс мероприятий, определяющих эффективность их использования, сохранение работоспособности и экономичности в условиях реальной эксплуатации [1].

Для решения задач анализа и совершенствования процесса технической эксплуатации дизельных локомотивов необходимо иметь модель, позволяющую использовать в исследовании статистические методы.

Основными понятиями, используемыми при разработке модели процесса технической эксплуатации дизельных локомотивов, являются объект эксплуатации; технические состояния объекта эксплуатации ω_i, режимы эксплуатации δ_i, состояния условий эксплуатации γ_i, процесс технической эксплуатации $\delta(t)$ стратегия технической эксплуатации $S_э$.

Под объектом эксплуатации понимается система, включающая в себя дизель тепловоза и непосредственно связанные с ним потребители вырабатываемой энергии (тяговый генератор, вентилятор тяговых электродвигателей, компрессор, вентилятор холодильной камеры и т. д.). В математической модели объект эксплуатации представляет собой совокупность Ω его технических состояний ω_i. Состояния ω_i определяются конструктивными особенностями и техническим состоянием отдельных узлов дизеля, регулировкой и настройкой агрегатов, наличием и качеством воды, топлива, смазки и т. д.

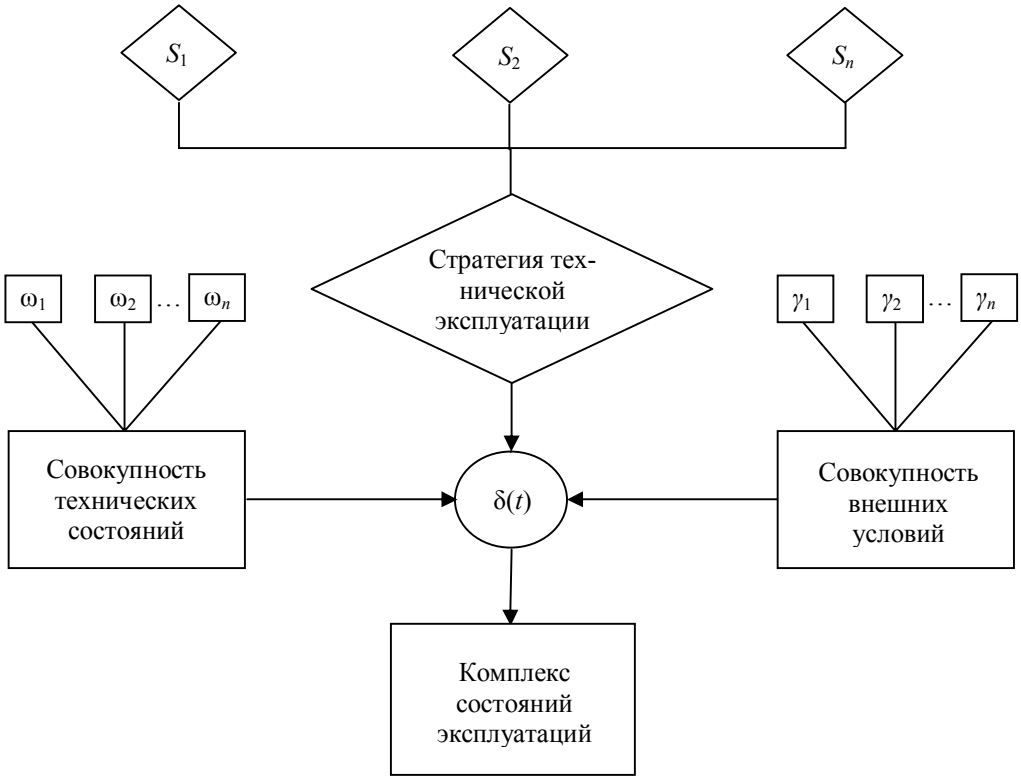
Режимы эксплуатации объекта γ_i определяются видом работы локомотива (ожидание работы, маневровые операции, тяга поездов, торможение, выбег, стоянка под поездом), режимом работы дизеля (холостой ход, режим нагрузки), номером позиции контроллера машиниста, сочетанием нагрузок вспомогательного оборудования (компрессор включен, вентилятор выключен, компрессор и вентилятор включены и т. д.) [2].

Состояние условий эксплуатации локомотива γ_i во многом определяется внешними условиями: массой поезда, нагрузкой на ось вагона, родом груза, профилем и состоянием пути, путевыми сигналами и параметрами окружающей среды. Возможные состояния γ_i внешних условий составляют совокупность (множество) Γ.

Процесс технической эксплуатации тепловоза $\delta(t)$ в математической модели определяется как стохастическое отображение комплексов технических состояний Ω и внешних условий Γ на множество состояний эксплуатации Δ. Условно это отображение можно выразить следующим образом:

$$\{\Omega, \Gamma\} \xrightarrow{\delta(t)} \Delta; \qquad (1)$$

Следовательно, процесс технической эксплуатации локомотива $\delta(t)$ определяется как процесс возникновения и смены режимов эксплуатации δ_i под воздействием конкретных состояний объекта эксплуатации ω_i и внешних условий δ_i. Графическое изображение модели процесса технической эксплуатации дизельного локомотива показана на рисунке.



Структурная схема технической эксплуатации дизельного локомотива

Множества Ω и Γ формируют комплекс Δ состояний процесса технической эксплуатации $\delta(t)$, т. е. определяют статистические закономерности повторения и продолжительности режимов δ_i, переходов из одного состояния δ_i в другое.

С одной стороны, отображение (1) носит стохастический, случайный характер, отражающий объективную составляющую процесса $\delta(t)$, с другой стороны, ω_i и δ_i, а значит, и отображение Ω и Γ на Δ посредством $\delta(t)$, определяются субъективным фактором. Поэтому процесс $\delta(t)$ является в значительной степени управляемым.

Субъективная составляющая со стороны Ω отражается, например, выбором системы обслуживания и ремонта, нормируемыми параметрами и качеством настройки аппаратуры и характеристик дизель-генератора, а со стороны Γ – выбором характеристик поезда, графика движения поездов и т. д. Эта субъективная составляющая воздействия Ω и Γ на Δ и $\delta(t)$ определяется стратегией технической эксплуатации $S_э$. Под стратегией $S_э$ понимается совокупность правил, управляющих воздействий и порядок их применения.

Правила стратегии $S_э$ могут быть установлены и откорректированы на основе изучения состояний ω_i, δ_i, свойств процесса $\delta(t)$, режимов эксплуатации δ_i и их эффективности. Часть правил может быть направлена на создание более благоприятных комплексов Ω и Γ, а часть – на формирование наиболее эффективных режимов эксплуатации δ_i в зависимости от ω_i и γ_i. В случае достаточно полной и определенной стратегии $S_э$ можно считать, что режимы эксплуатации выбираются и назначаются в некотором соответствии (носящем в основном стохастический характер) с техническим состоянием объекта эксплуатации ω_i и условиями эксплуатации γ_i. Тогда конечной целью исследования процесса технической эксплуатации $\delta(t)$ и оценки эффективности его состояний следует признать корректировку существующей стратегии $S_э$.

Основные понятия и элементы модели процесса технической эксплуатации локомотива, а также описание их взаимодействия дополняются количественными характеристиками. Такими характеристиками переходов по состояниям процесса технической эксплуатации являются вероятности P_{ij} перехода процесса $\delta(t)$ из режимного состояния δ_i в δ_j и время t_i пребывания объекта в состоянии δ_i. Время t_i рассматривается как случайная величина и характеризуется интегральной функцией распределения $F_{i(t)}$ или плотностью распределения вероятностей $f_{i(t)}$ [2].

С помощью введенных понятий модель эксплуатации дизельного локомотива описывается следующим образом. Первоначально при $t = t_0$ процесс технической эксплуатации $\delta(t)$ находится в некотором состоянии $\delta_i \in \Delta$. Через случайное время t_i, распределенное по закону $F_{i(t)}$, с вероятностью P_{ij} в момент $t_1 = t_0 + t_i$ в соответствии с техническим состоянием $\omega_i \in \Omega$, внешними условиями $\gamma_i \in \Gamma$ и стратегией эксплуатации $S_э$ процесс $\delta(t)$ переходит в состояние $\delta_i \in \Delta$. В некоторый момент $t_2 = t_1 + t_j$ осуществляется новый переход по приведенной схеме.

Вероятности переходов P_{ij} и законы $F_{i(t)}$ распределения времени пребывания объекта в состоянии δ_i являются важнейшими количественными характеристиками модели процесса технической эксплуатации $\delta(t)$, которые можно оценивать статистическими методами. Для этого с помощью прямых или автоматизированных наблюдений за процессом технической эксплуатации группы тепловозов в течение времени $t_н$ необходимо определить число n_{ij} переходов из δ_i в δ_j. При наличии указанной информации вероятность переходов P_{ij} оценивается выражением:

$$\widetilde{P}_i = \frac{n_{ij}}{n_i}, \qquad (2)$$

где n_i – общее число попаданий в состояние δ_i.

Оценку вероятности P_i пребывания процесса $\delta(t)$ в состоянии δ_i дает величина

$$\widetilde{P}_i = \frac{t_{iн}}{t_н}, \qquad (3)$$

где $t_{iн}$ – общее время пребывания в состоянии δ_i.

Совокупность $\left\{\widetilde{P}_{ij}, P_i, F_{i(t)}\right\}$ определяет количественную структуру процесса технической эксплуатации. Для оценки эффективности эксплуатации объекта необходимо количественно описать режимные состояния процесса технической эксплуатации дизель-генераторной установки тепловоза. Прежде всего эти режимные состояния характеризуются развиваемой дизель-генератором мощностью N_i, величина которой переменна во времени, т. е. изменяется от состояния δ_i к состоянию δ_j и даже в период пребывания в фиксированном состоянии.

Нестабильность уровня мощности в каждом фиксированном состоянии δ_j обусловлена переходными процессами в дизель-генераторе, изменениями режимов нагрузки вспомогательных агрегатов и системы управления дизелем. В общем случае величина мощности является случайной для каждого режимного состояния δ_i и характеризуется плотностью распределения $f_i(N)$.

Плотность распределения $f(N)$ мощности ДГУ тепловоза, развиваемой в процессе эксплуатации, определяется по правилу суперпозиции:

$$f(N)=\sum_{i=1}^{n}P_i f_i(N), \tag{4}$$

где P_i – вероятность пребывания ДГУ в состояниях δ_i.

В этом случае основными характеристиками мощности дизель-генератора будут математические ожидания $\overline{N}$ и дисперсия D, которые определяются из выражения:

$$\overline{N}=\int_0^{\infty}Nf(N)dN=\int_0^{\infty}N\sum_{i=1}^{n}P_i f_i(N)dN=\sum_{i=1}^{n}P_i\overline{N}, \tag{5}$$

где $\overline{N}_i=\int_0^{\infty}Nf_i(N)dN$.

$$D=\int_0^{\infty}(N-\overline{N})^2 f(N)dN=\int_0^{\infty}(N-\overline{N})^2\sum_{i=1}^{n}P_i f_i(N)dN. \tag{6}$$

Развиваемая ДГУ мощность расходуется на выполнение работы тяги поезда A и на привод вспомогательного оборудования тепловоза. Величина работы A обусловливается комплексом условий Ω и Γ, которые определяют еще и то, каким образом выполняется эта работа. Если за время наблюдения t_i ДГУ находится в состояниях δ_i время t_{ij}, то:

$$A=\sum_{i=1}^{t_{i\text{н}}}N_i t_{i\text{н}}. \tag{7}$$

На выполнение работы А дизелем расходуется количество топлива

$$B=\sum_{i=1}^{t_{\text{н}}}b_e(N_i)N_i t_{i\text{н}}, \tag{8}$$

где $b_e(N_i)$ – удельный расход топлива на единицу работы ДГУ.

Выражение (8) определяет абсолютную величину расхода топлива. Для оценки эффективности эксплуатации тепловозных дизелей необходимо перейти к среднему за время $t_{\text{н}}$ часовому расходу топлива

$$B_{\text{ч}}=\frac{B}{t_{\text{н}}}=\frac{\sum_{i=1}^{t_{\text{н}}}b_e(N_i)N_i t_{i\text{н}}}{t_{\text{н}}}=\sum_{i=1}^{n}b_e(N_i)N_i\widetilde{P}_i, \tag{9}$$

где $\widetilde{P}_i$ – статистическая оценка вероятности P_i пребывания дизель-генератора в состоянии δ_i.

В выражении (9) удельный расход топлива $b_e(N_i)$ можно заменить его стоимостью и тогда формула (9) будет определять денежные затраты. Следовательно, выражение (9) определяет в математической модели процесса технической эксплуатации тепловоза величину подлежащих минимизации затрат, т. е. одну из целевых функций процесса.

Рассмотрим подробнее возможности минимизации затрат через отдельные составляющие формулы (9). Величины вероятностей P_i (или их статистические оценки $\widetilde{P}_i$) характеризуют долю времени пребывания процесса эксплуатации δ_t в состояниях δ_i. С видом состояния δ_i связаны все остальные составляющие формулы затрат (9).

Таким образом, перераспределение значений величин P_i при условии $P_1+P_2+...P_n=1$ предоставляет большие возможности влияния на топливную экономичность. Сам вектор $\overline{P}=(P_1,P_2,...P_n)$ определяется комплексами состояний Ω и Γ и стратегией эксплуатации $S_{\text{э}}$. По сути вектор $\overline{P}$ в обобщенном виде полностью отражает состояние ремонтного и перевозочного процессов, поэтому изучение совокупности $\{P_i\}$ – одна из важнейших задач исследования процесса эксплуатации тепловозов.

Другой фактор в выражении (9) – совокупность N_i. Значения N_i определяются в основном конструктивными решениями дизель-генератора, и поэтому субъективное воздействие на них в условиях локомотивного депо ограничено.

Затраты на выполнение работы дизель-генератором зависят еще и от удельного расхода топлива $b_e N_i$. Эта топливная характеристика дизеля для каждой серии тепловозов определяется как конструкцией дизеля, так и техническими нормативами по ремонту и эксплуатации локомотивов, т. е. элементами стратегии эксплуатации $S_э$.Следовательно, решение задачи повышения топливной экономичности дизелей может быть осуществлено путем совершенствования стратегии $S_э$ на стадии их создания и в процессе эксплуатации [3].

Одним из путей совершенствования стратегии $S_э$ при создании новых дизелей должно быть уточнение вида зависимости $b_e(N)$ для генеральной совокупности режимов работы дизелей тепловозов Δ на сети железных дорог [1].

В процессе эксплуатации серийных тепловозов стратегию $S_э$ необходимо корректировать в соответствии с местными условиями. Например, при реостатных испытаниях тепловозов характеристики дизель-генераторных установок настраивать с учетом особенностей комплексов Ω, Γ и вероятностей P_i, приведенных в моделях (1), (9). Данный способ может быть реализован непосредственно в депо или на тепловозоремонтных заводах без дополнительных конструктивных изменений и затрат.

Таким образом, описанная модель процесса технической эксплуатации позволяет количественно оценить характеристики состояний дизеля, выбрать критерии эффективности работы тепловозных дизель-генераторов и наметить пути снижения расхода топлива в условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Балакин, В. И. / Повышение надежности и улучшение технико-экономических показателей тепловозных дизелей [Текст] / В. И. Балакин. – Л. ЦНИДИ. 1983. – 155 с.

2. Александров, А. М. / Вероятностное описание, экспериментальное и теоретическое исследование режимов работы тепловозных дизелей [Текст] / А. М. Александров, В. А. Четвергов, А. В. Чулков // Повышение надежности и улучшение технико-экономических показателей тепловозных дизелей: Труды / Центральный научно-исследовательский дизельный институт. – Л., 1983. – С. 11 – 27.

3. Фофанов, Г. А. / Режимы работы тепловозов и пути повышения их топливной экономичности [Текст] / Г. А. Фофанов, Э. А. Пахомов, А. А. Лосев // Вестник ВНИИЖТа. – 1983. – № 6. – С. 21 – 25.

УДК 629.423.31

Д. Ю. Белан, В. М. Лузин

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В данной статье проведен анализ существующих методов упрочнения поверхности деталей машин. Для повышения износостойкости коллекторных пластин тяговых электродвигателей предлагается использовать метод электроискрового легирования.

Надежность работы тяговых электродвигателей (ТЭД) во многом зависит от исправного состояния коллекторно-щеточного узла (КЩУ). Наиболее уязвимым звеном КЩУ является

коллектор. По внешнему виду контактной поверхности коллектора судят о состоянии и работе ТЭД в целом. Коллектор двигателя, находящегося в эксплуатации, в идеальных условиях должен иметь на контактной поверхности коллекторных пластин глянцевую темно-коричневую пленку (политуру) повышенной твердости. Такая политура увеличивает коммутационную устойчивость двигателя и значительно снижает износ коллекторных пластин. Однако такие условия в эксплуатации зачастую не выполнимы.

При движении локомотива ТЭД испытывает значительные динамические нагрузки со стороны рельсового пути. Эти нагрузки особенно возрастают в зимнее время года из-за повышения жесткости земляного полотна и превышают статические в 10 – 15 раз. Дополнительные динамические нагрузки возникают со стороны контактной сети при обрыве и восстановлении питания. В процессе движения локомотива может возникать превышение допустимых частот вращения якоря (при боксовании). Эти перегрузки при определенных условиях приводят к возникновению электромеханических резонансных колебаний звена «якорь – магнитная система», что вызывает различные повреждения, которые усугубляют нормальную работу КЩУ.

К часто встречающимся неисправностям коллектора ТЭД относится механический и электроэрозионный износ. Основными причинами механического износа являются применение щеток с повышенным коэффициентом трения; плохая очистка воздуха, поступающего для охлаждения; чрезмерное нажатие щеток; перегрев отдельных пластин; биение коллектора вследствие его эксцентриситета.

Электроэрозионный износ контактной поверхности вызывается неудовлетворительной коммутацией, приводящий к подгару коллекторных пластин, что может спровоцировать круговой огонь по коллектору, приводящий к прожогу и оплавлению пластин, распайке концов якорной обмотки в «петушках» коллектора. Перебросы по коллектору или на корпус двигателя могут быть вызваны загрязнением коллектора щеточной пылью.

Перечисленные неисправности коллектора устраняют обточкой, продорожкой, снятием фасок, шлифовкой и полировкой. Шероховатость обработанной поверхности должна соответствовать 8-му – 9-му квалитету согласно нормативным документам [1, 2]. Однако абразивная обработка отрицательно сказывается на работе КЩУ. Для исключения операций шлифования и полирования из технологического процесса ремонта ТЭД предлагается после продорожки создавать оксидную пленки типа политуры повышенной твердости с новыми свойствами, обеспечивающими повышение коммутационной устойчивости и снижение износа коллектора.

Существуют различные методы упрочнения поверхностей деталей машин из сталей и сплавов, которые можно подразделить на следующие группы в зависимости от технологического приема изменения поверхностных или объемных свойств материала.

Упрочнение путем создания поверхностных пленок, при котором структура внутренних слоев материалов остается неизменной. Упрочнение осуществляется формированием покрытия за счет химических и диффузионных реакций между элементами парогазовых смесей и материала изделия. Покрытия могут реализовываться газопламенным, плазменным, детонационным и другими известными видами напыления. При этом триботехнические свойства тел во многом определяются структурой и химическим составом поверхностных покрытий.

Другим прогрессивным подходом к созданию качественного упрочнения поверхностей в настоящее время считается исследование, разработка и совершенствование технологий получения поверхностных слоев с заданными составом, структурой и, соответственно, с требуемыми свойствами. При этом необходимо учитывать, что решающее значение при формировании структуры слоя имеют энергетическая способность взаимодействия насыщающего элемента, физико-химическая природа насыщающей среды и механизм фазовых превращений [3]. Широкие перспективы в этом направлении открывает технологическое обеспечение износостойкости металлических поверхностей на основе электрофизических способов упрочнения с применением высокоэнергетических концентрированных потоков энергии. В по-

следние годы эти методы используются для легирования приповерхностных слоев металлов и сплавов.

Проблема повышения надежности и долговечности деталей машин и инструментов может быть решена относительно дешевой, нетрудоемкой, но высокоэффективной механической обработкой. Важнейшим условием повышения надежности машин является работоспособность деталей узлов трения, которая в свою очередь связана с их износостойкостью. Одним из основных факторов, определяющих износостойкость деталей машин, является сопротивление материалов разрушающему действию абразивных частиц. Особого внимания заслуживает возможность повышения сопротивления металлов абразивному изнашиванию путем изменения их физико-механических свойств, т. к. в этом случае не требуется замена применяемых материалов на более дорогие и дефицитные. Поэтому повышение абразивной износостойкости может быть достигнуто путем применения известных, но не нашедших широкого распространения технологических операций. Например, среди технологических способов повышения абразивной износостойкости металлов большое значение принадлежит механической обработке. Использование этого способа позволяет повысить абразивную износостойкость до 40 – 80 % [4].

Существующие методы термической обработки можно разделить на объемные и поверхностные. К первым относят традиционные процессы термической обработки: отжиг, нормализацию, закалку, отпуск; ко вторым – все способы поверхностной закалки, создания электрохимических покрытий и химико-термическую обработку. Одним из наиболее широко применяемых вариантов поверхностной обработки являются химико-термические методы, способствующие повышению эксплуатационных характеристик изделий, изменению химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев [5].

Для получения требуемых свойств материалов широко используются комбинированные методы поверхностного упрочнения. Использование комбинированных покрытий дает возможность создавать поверхностные слои с заданными разнообразными физико-химическими и механическими свойствами [6]. Метод электроискрового легирования (ЭИЛ) основан на явлении электрической эрозии материалов при искровом разряде в газовой среде (преимущественно на воздухе), полярного переноса продуктов эрозии на катод (деталь), на поверхности которого формируется слой измененных структуры и состава. Величина этих изменений традиционно определяется составом, структурой, свойствами материалов электродов и технологическими параметрами процесса ЭИЛ.

Формирование упрочненного слоя происходит в результате сложных плазмохимических, теплофизических и механотермических процессов, реализуемых на микролокальных участках воздействия единичного искрового разряда и в общем случае протекает по следующей схеме (рисунок 1). При сближении легирующего электрода с упрочняемой поверхностью на определенном расстоянии происходит искровой разряд длительностью 10^{-6} – 10^{-3} с.

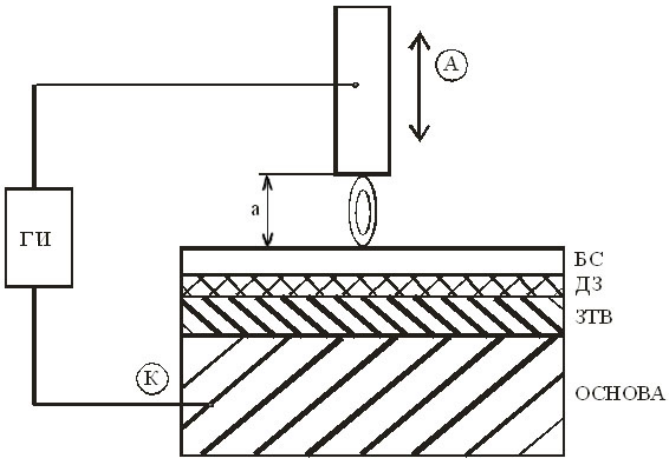


Рисунок 1 – Общая схема процесса электроискрового легирования: А – легирующий электрод (анод); К – поверхность детали (катод); а – межэлектродный промежуток; ГИ – генератор импульсов; БС – белый слой; ДЗ – диффузионная зона; ЗТВ – зона термического влияния

В результате на поверхностях анода и катода образуются локальные очаги плавления и испарения, вызывающие их электрическую эрозию и взаимный массоперенос. Благодаря полярному эффекту, связанному с преимущественным переносом эродируемого материала анода на катод, на поверхности последнего формируется тонкое покрытие с определенными фи-

зико-химическими и механическими свойствами. Параллельно действующее импульсное тепловое воздействие вызывает гамму механотермических процессов, приводящих поверхностные слои электродов в сложнонапряженное состояние вплоть до их пластической деформации и хрупкого разрушения. Поскольку электроды при искровом разряде находятся в кинематической связи между собой, вслед за осажденными частицами упрочняемая поверхность подвергается ударно-вибрационному воздействию. В течение каждого акта контактного взаимодействия между электродами образуются и тут же разрушаются микролокальные мостики сварки, вызывающие дополнительную к механическому воздействию пластическую деформацию упрочняемых поверхностных слоев. Энергетическое воздействие высокой концентрации стимулирует протекание сопутствующих электроискровому легированию микрометаллургических процессов, в частности, термохимических, газодинамических и диффузионных.

Упрочненная поверхность, сформированная электроискровым легированием, представляет новую композиционную структуру, которую в общем случае можно представить следующим образом. Верхний слой представляет пленку из материала анода, модифицированного элементами материала катода и межэлектродной среды, лежащего на поверхности в виде отдельных «островков», сплошность которых зависит от режимов упрочнения, материала анода и времени обработки. Под ним располагается зона, состоящая из смеси материалов анода и катода, образованная в результате конденсации ионно-плазменной и капельной фазы на упрочняемой поверхности («белый» слой). Далее следует слой, сформированный за счет диффузии химических элементов материала анода в упрочненном материале катода (диффузионная зона). И, наконец, под ним располагается нижний, наибольший по толщине слой, образованный в результате импульсного теплового воздействия (зона термического влияния). Этот слой представляет собой структуру, трансформированную из материала упрочняемой детали, отличаясь от нее кристаллографическим строением и зернистостью. С перемещением вглубь данная структура переходит в структуру основного металла.

В зависимости от режимов электроискрового легирования значимость первых трех слоев может быть существенной, а роль структуры, сформированной под действием импульсного теплового воздействия, является всегда основополагающей, определяющей эффективность упрочнения.

Упрочнение происходит

за счет осаждения на поверхности катода материала противоположного электрода (анода). Наибольший эффект достигается при использовании материала легирующего электрода с высокой твердостью;

диффузии материала анода в катод и образования растворов, смесей, химических соединений. Происходит насыщение поверхности оксидами, нитридами, а также образование на поверхности метастабильных фаз с очень мелким зерном;

образования зоны взаимной кристаллизации Me1 и Me2 и неравновесных структур, фаз, а также мелкозернистой структуры.

Суть данного метода заключается в том, что при сближении электродов напряженность электрического поля увеличивается и при некотором зазоре между ними она достигает величины, достаточной для возникновения искрового электрического разряда. Через возникший канал сквозной проводимости пучок электронов фокусированно ударяется о металлическую поверхность анода. Кинетическая энергия заторможенных электронов выделяется в поверхностных слоях анода. В связи с тем, что система броском освобождает накопленную энергию, плотность тока значительно превосходит критические значения. В результате этого от анода отделяется капля расплавленного металла, которая движется к катоду, опережая движущийся анод.

Летящая капля при перемещении в межэлектродном пространстве успевает нагреваться до высокой температуры, закипает и «взрывается». Цепь тока прерывается, сжимающие усилия электромагнитного поля исчезают и частицы разлетаются широким фронтом. Так как

перегретая капля и частицы находились в соприкосновении с межэлектродной средой, то по составу и свойствам они отличаются от исходного материала легирующего электрода анода. Расплавленные частицы, достигнув поверхности катода, свариваются с ним и частично внедряются в поверхность. Процесс на этом не заканчивается, поскольку вслед за частицами движется электрод, включенный в систему, уже успевшую вновь накопить энергию. Через раскаленные частицы, лежащие на катоде, происходит второй импульс тока, сопровождающийся механическим ударом движущейся массы анода.

На следующем этапе процесса при механическом контакте электродов частицы свариваются между собой и прогревается тонкий слой поверхности катода, на котором они расположены. При этом помимо диффузии перенесенных частиц в толщину катода под действием электрического тока происходят химические реакции между этими частицами и материалом катода. Механический удар по раскаленной массе материалов проковывает полученное покрытие, чем значительно увеличивает его однородность и плотность. Далее анод движется вверх, а на поверхности катода остается прочно соединенный с ним слой материала анода.

Из приведенной модели процесса электроискрового упрочнения следует, что перенос материала анода происходит с момента пробоя межэлектродного промежутка до соприкосновения его с поверхностью катода; с момента пробоя и до соприкосновения электродов происходят два импульса тока и вещество переносится в плазменном состоянии.

Схема формирования углеродного слоя на коллекторе электрической машины постоянного тока (рисунок 2) работает следующим образом

Якорь ЭМ 2 приводится во вращение электродвигателем 4 через муфту 5, червячный редуктор 6 и ременную передачу 7. Напряжение с генератора импульсов 3 подается на углеродные электроды 1, которые прижаты к коллекторным пластинам с усилием 1Н и закреплены на изолирующей штанге.

Перед началом работы по формированию углеродного слоя коллектор электродвигателя обтачивается, осуществляется продорожка коллекторных пластин. Далее включаются механизм поворота якоря и генератор импульсов. На углеродные электроды подается напряжение от генератора импульсов с определенной частотой, и якорь начинает вращаться. Таким образом и осуществляется процесс формирования углеродного слоя на коллекторе ЭМПТ.

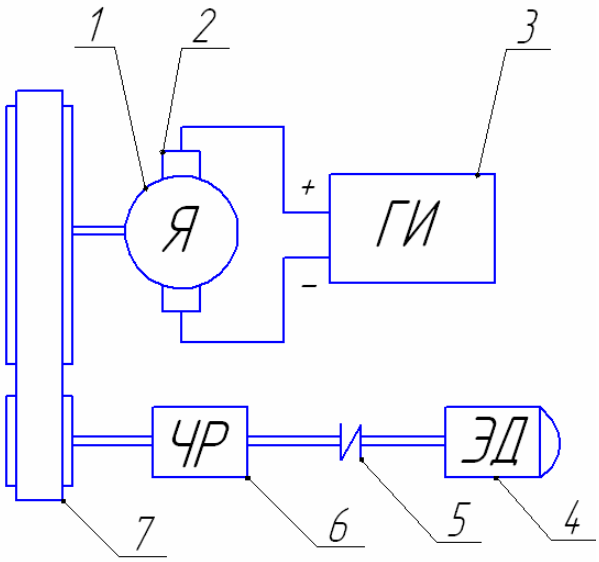


Рисунок 2 – Схема формирования углеродного слоя на коллекторе электрической машины постоянного тока

Метод ЭИЛ был апробирован для упрочнения коллекторных пластин двигателя общепромышленного изготовления типа П31 с номинальной мощностью 1,5 кВт, частотой вращения 1500 об/мин, напряжением питания 220 В, с параллельным возбуждением. Предварительно на поверхности коллектора была наработана политура и снята безыскровая зона. Расположение ветвей безыскровой зоны (рисунок 3, а) характеризует некоторое превышение реактивной ЭДС над коммутирующей, т. е. коммутация носит замедленный характер. Кривые токов подпитки и отпитки пересекаются при токе нагрузки, равном 1,75 $I_{н.}$

После испытаний коллектор был вновь прошлифован, т. е. была снята политура и проведено электроискровое легирование по схеме рисунка 2. Безыскровая зона, снятая после обработки коллектора ЭИЛ дала поразительные результаты (рисунок 3, б). Увеличение тока нагрузки не вызывало сужения кривых подпитки – отпитки, а, наоборот, они расширялись и

при токе нагрузки, равном 2 $I_н$, токи подпитки и отпитки, превышающие 2 $I_н$, не вызывали искрения щеток. Дальнейшее увеличение токов нагрузки и подпитки в связи с опасностью перегрева обмоток добавочных полюсов было приостановлено.

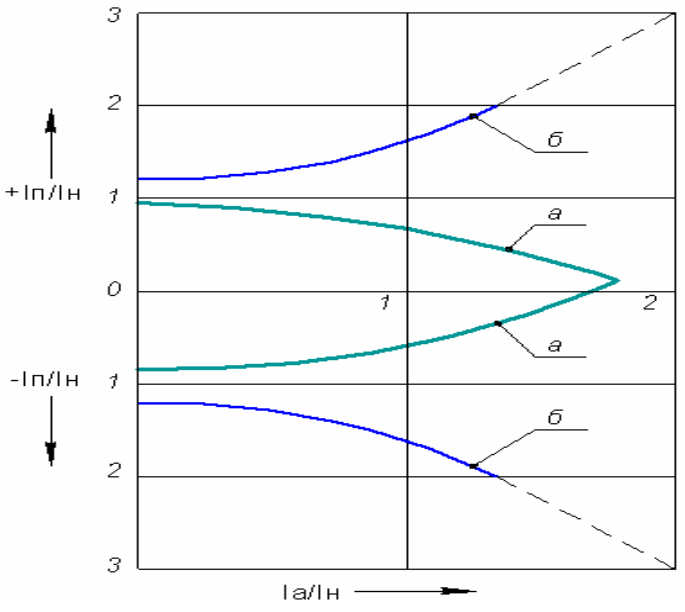


Рисунок 3 – Безыскровые зоны: а – при нормальной политуре; б – после обработки коллектора ЭИЛ

Такое расположение безыскровых зон (см. рисунок 3, б) объясняется тем, что в процессе обработки коллекторных пластин ЭИЛ произошло науглероживание их материалом щеток. Поверхностный слой коллекторных пластин приобрел новые свойства и приблизился по свойствам к угольно-графитному коллектору. Физическую сущность защиты меди углеродной плазмой и способ ее нанесения предложил автор патента [7]. Как показано в работе [7], при нанесении углеродной пленки толщиной 10 мкм температура на поверхности меди понижается в пять раз. Этим обстоятельством можно объяснить расширение безыскровой зоны.

Таким образом, данный метод, как более перспективный, можно рекомендовать для осаждения углерода и повышения твердости поверхности коллекторных пластин ТЭД. Метод ЭИЛ позволит повысить надежность работы КЩУ ТЭД, получить высокие эксплуатационные свойства в поверхностных слоях за счет науглероживания коллекторных пластин материалом рабочих щеток, улучшить коммутационные свойства, повысить ресурс работы тягового электродвигателя и подвижного состава в целом.

Список литературы

1. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава. ЦТ-ЦТВР/4782. М., 1992. – 296 с.

2. Правила текущего ремонта и технического обслуживания электровозов переменного тока. МПС РФ. ЦТ-635.М., 1999. – 404 с.

3. Бровер, А. В. Влияние поверхностной термообработки с использованием концентрированных потоков энергии на конструкционную прочность стали [Текст] / А. В. Бровер // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 10. – С. 22 – 27.

4. Маслов, Л. Н. Влияние пластичности стали, упрочненной высокотемпературной термомеханической обработкой, на интенсивность абразивного изнашивания [Текст] / Л. Н. Маслов, О. И. Шаврин // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – № 6. – С. 613 – 621.

5. Дубинин, Г. Н. О перспективах развития химико-термической обработки металлов [Текст] / Г. Н. Дубинин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 7. – С. 5, 6.

6. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей [Текст] / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко / АН СССР. – М., 1958. – 177 с.

7. Патент RU №2008698 C1. Способ нанесения защитного покрытия на рельсы электромагнитного ускорителя / Колесников В. А. Заявлено 21.05.1990; Опубл. 28.02.1994, Бюл. № 4. – 4 с.: ил.

УДК 629.4.082

А. В. Бородин, Д. В. Тарута

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОТОРНО-ОСЕВОГО УЗЛА КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА ЛОКОМОТИВА

Предложены новые конструктивные решения моторно-осевого узла локомотива, позволяющие повысить его эксплуатационные характеристики.

Моторно-осевой подшипниковый узел с подшипниками скольжения, получивший широкое распространение на отечественном тяговом подвижном составе, несложной конструкции и удобный в эксплуатации, не лишен недостатков:

при высоких скоростях движения локомотива подача жидкой смазки в зону трения фитилями, размещенными в рабочей камере и прижатыми к шейке оси колесной пары пластиной, не обеспечивает нормального режима трения в моторно-осевом подшипнике (МОПе) из-за отрыва прижимного устройства от оси колесной пары;

загрязнение фитилей различными механическими примесями со стороны средней части оси и замасливание трущихся поверхностей польстера;

замерзание фитилей и прижоги МОПа из-за неустойчивости фитильной подачи масла при обводнении фитильной пряжи от попадания влаги, а также осерненной смазки в масляные ванны МОПа;

низкая несущая способность нижнего вкладыша МОПа в зоне окна, предназначенного для размещения фитилей и польстера;

незначительная площадь контакта с шейкой оси при гиперболической расточке рабочих поверхностей вкладышей МОПа;

низкая несущая способность масляного клина, особенно при высоких скоростях движения локомотива, из-за недостаточной подачи смазки боковыми поверхностями фитилей в зону трения;

выброс значительной части жидкой смазки из зоны трения в неотработанном виде при низких скоростях движения локомотива [1, 2].

Анализ причин выхода из строя МОПа скольжения в условиях эксплуатации позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на долговечность и безаварийность работы моторно-осевого подшипникового узла оказывают площадь контакта, условия смазывания и герметизации рабочих поверхностей подшипника и шейки оси колесной пары. В связи с этим одной из первоочередных является задача совершенствования моторно-осевого подшипникового узла колесно-моторного блока локомотивов с целью снижения затрат на обслуживание и ремонт МОПа в эксплуатационных и ремонтных депо сети дорог [3, 4].

С учетом изложенного авторами разработаны новое конструктивное решение моторно-осевого подшипника скольжения с повышенной площадью контакта (за счет исключения окна для подвода смазки) и улучшенным уплотнением рабочей поверхности и система принудительного смазывания поверхностей трения, учитывающая недостатки существующих систем.

Предлагаемое устройство моторно-осевого подшипника скольжения локомотива с возможностью применения принудительной системы смазки рабочих поверхностей содержит вкладыши со стальными корпусами, вмонтированные в стальные корпуса каждого вкладыша, радиальную опору – полувтулку и осевую опору – полудиск, полукольца, подпружиненные экспандерами и установленные в канавки полудиска и буртика корпуса. Кольцевые канавки на наружной поверхности полувтулки выполнены с кольцевыми буртиками, на внутренней поверхности полувтулки выполнены углубления, например, конической формы, образующие рельеф с системой дискретных углублений, полости кольцевых канавок соединены каналами с углублениями. Со стороны буртика корпуса выполнен канал, связанный с полостью кольцевой канавки у буртика корпуса, при этом полость каждой последующей коль-

цевой канавки соединена каналами с полостью предыдущей канавки, а полость канавки у осевой опоры соединена каналами с углублениями на торцовой поверхности полудиска через коллектор, заполненный, например, металлической сеткой. Решение технической задачи поясним рисунками.

Моторно-осевой подшипник скольжения состоит из верхнего 1 и нижнего 2 вкладышей (рисунок 1). Каждый вкладыш содержит стальной корпус 3, в который вмонтированы радиальная опора – полувтулка 4 и осевая опора – полудиск 5 (рисунок 2). На наружной поверхности полувтулки выполнены кольцевые канавки 6 с концевыми буртиками 7 (рисунок 3). На внутренней поверхности полувтулки выполнены углубления 8, которые соединены каналами 9 с полостями кольцевых канавок 6. В корпусе 3 со стороны упорного буртика выполнен канал 10, связанный с полостью кольцевой канавки полувтулки. Полости кольцевых канавок 6 соединены между собой каналами 11, при этом полость канавки у осевой опоры 5 соединена каналами 12 и 13 с углублениями 14 на торцовой поверхности полудиска через коллектор 15, заполненный, например, металлической сеткой 16.

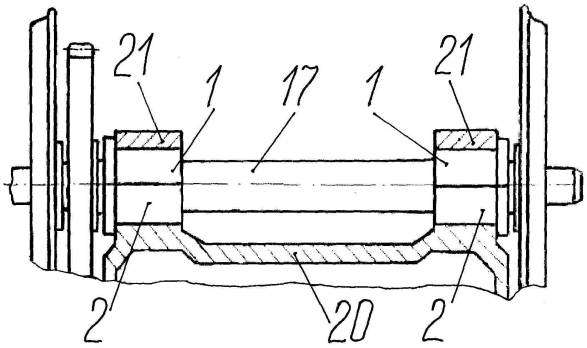


Рисунок 1 – Продольный разрез подшипникового узла колесно-моторного блока

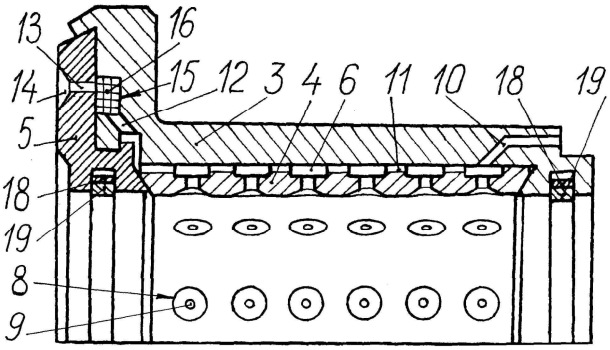


Рисунок 2 – Продольный разрез вкладыша опоры скольжения

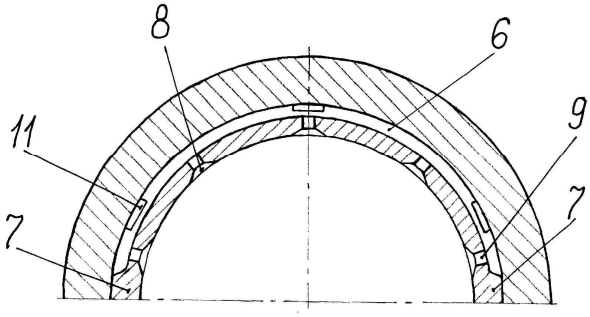


Рисунок 3 – Поперечный разрез вкладыша по кольцевой канавке полувтулки

Сборку вкладыша осуществляют в следующей последовательности. Полувтулку вводят в контакт с поверхностью упорного буртика корпуса, затем радиальным перемещением полудиска вводят его во фланец корпуса 3. Осевое положение полудиска фиксируют завальцовкой цилиндрического пояска корпуса 3 на наружную коническую поверхность полудиска. Перед установкой вкладышей на ось 20 в канавки буртика корпуса 3 и полудиска 5 устанавливают экспандеры 18 и полукольца 19. Нижние вкладыши 2 с колесной осью 20 укладывают на постели остова 21 тягового двигателя, затем устанавливают верхние вкладыши 1 и шапки МОПа 22.

При движении локомотива к трущимся поверхностям вкладышей подшипников подводится жидкий смазочный материал. Подача смазочного материала осуществляется через канал 10 в кольцевую полость 6 у буртика корпуса. Через каналы 11 смазочный материал поступает во все кольцевые полости, которые запираются буртиками 7. Из кольцевой полости у осевой опоры смазочный материал поступает через каналы 12 в коллектор 15 и далее, через каналы 13, – в углубления 14 осевой опоры. Так как коллектор 15 заполнен пористым материалом, например, металлической сеткой с ячейками малой величины, то потоку смазочного материала в углублениях 14 создается большое сопротивление и смазочный материал поступает в углубления 14 малыми дозами. Одновременно из кольцевых канавок через каналы 9 смазочный материал поступает в углубления 8 радиальной опоры. Утечка масла через вкладыши стабилизируется уплотнениями 19 и сопротивлением потоку в коллекторе 15. Так как углубления на поверхностях трения не

сообщаются между собой, то образуется рельеф с системой дискретных углублений. Это обеспечивает лучшее распределение смазочного материала по трущимся поверхностям, гидродинамическое давление в углублениях радиальной опоры вкладыша. Улучшение условий смазывания трущихся поверхностей способствует уменьшению скорости изнашивания рабочих поверхностей подшипника и снижению потерь на трение.

Для представленной конструкции моторно-осевого подшипника скольжения была специально разработана система смазывания, которая учитывает недостатки разработанных ранее систем.

Известны устройства для принудительного смазывания подшипника вала редуктора, включающие в себя подпружиненный плунжер, постоянно контактирующий с неподвижной поверхностью, на которой выполнен кулачок, цилиндр плунжера, вращающийся вокруг оси вала смазываемых подшипников, каналы для всасывания жидкого смазочного материала в полость плунжера и нагнетания из полости плунжера к подшипникам вала [5]. Пульсирующая подача жидкостного смазочного материала в зону работы подшипника требует точного размещения канала нагнетания, а забивка каналов всасывания и нагнетания продуктами изнашивания может исключить подведение смазочного материала в требуемую зону и нарушить работоспособность подшипникового узла.

Известна также и принудительная система смазывания моторно-осевых подшипников тягового электродвигателя локомотива, представляющая собой замкнутый круг циркуляции жидкого смазочного материала через вкладыши МОПа при помощи масляного насоса [6]. Такое устройство системы смазывания МОПа электродвигателя отличается сложностью конструкции. Это обусловлено прежде всего установкой насоса на крышке маслосборника, приводом его в действие от оси колесной пары через шестерню, смонтированную на оси колесной пары, необходимостью регулирования зазоров в зацеплении зубчатых колес. Изнашивание вкладышей в процессе эксплуатации нарушает работу зубчатой передачи, что в свою очередь ухудшает работу системы смазывания подшипников.

Предлагаемое конструктивное решение направленно на упрощение конструкции устройства смазывания МОПа, на повышение эксплуатационной надежности привода насоса системы смазывания, на обеспечение постоянного подведения в зону трения подшипников смазочного материала с требуемым давлением.

Авторами предлагается устройство принудительной системы смазывания моторно-осевых подшипников 1 и 2 на оси 3, которое содержит плунжерный насос 4 и кулачок 5 (рисунок 4). Насос 4 состоит из плунжера 6, клапанной коробки 7 и пружины 8. Корпус насоса 4 связан с осью 3 посредством разъемных опор 9.

Конструктивно опоры 9 могут быть выполнены с опорными поверхностями скольжения или качения. Клапанная коробка 7 содержит всасывающий 10 и нагнетательный 11 клапаны. Кулачок 5 для монтажа на ось 3 может быть выполнен разъемным. Система смазывания включает в себя каналы всасывания 12 и нагнетания 13. Канал нагнетания соединен с клапаном 14, ограничивающим величину давления смазочного материала, подаваемого в подшипники.

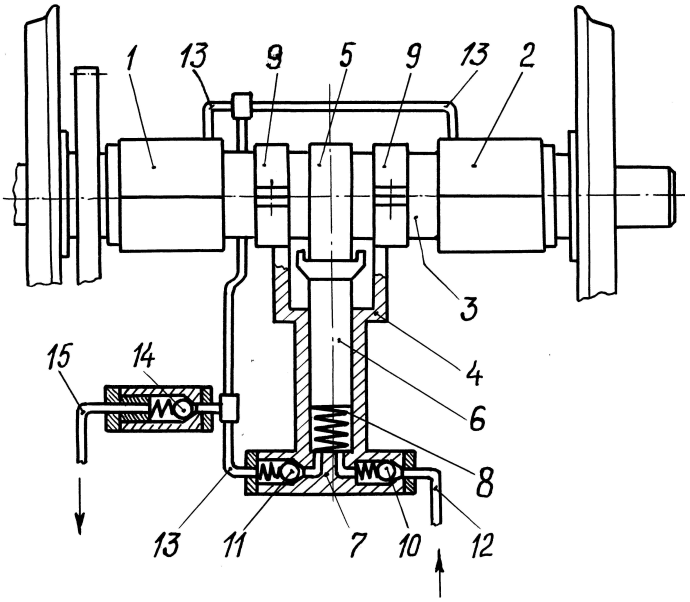


Рисунок 4 – Принудительная система смазывания моторно-осевых подшипников тягового электродвигателя локомотива

Перед работой системы смазывания регулируют минимальную величину сжатия пружины 8, например, подкладкой на торцовой поверхности плунжера 6 и максимальную величину давления нагнетания предохранительным клапаном 14.

Таким образом, крепление корпуса насоса посредством опор, размещенных на оси колесной пары, привод насоса от кулачка, которым снабжена ось колесной пары, обеспечивают компактность устройства, удобство его регулирования, а введение клапана, ограничивающего величину давления смазочного материала, способствует повышению эксплуатационной надежности привода насоса в системе принудительного смазывания моторно-осевых подшипников электродвигателя локомотива.

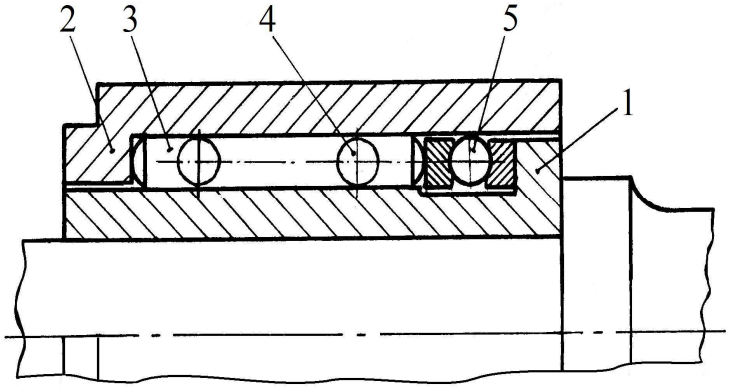


Рисунок 5 – Конструкция моторно-осевого подшипника качения

Для магистральных локомотивов нового поколения перспективно новое конструктивное устройство опоры качения (рисунок 5) [6]. Опора состоит из внутреннего 1 и наружного 2 однобортовых колец, между которыми размещены ролики 3 и сепараторы в виде волнообразных пластин или тел качения 4. Между бортом внутреннего кольца и роликами 3 размещен упорный шариковый подшипник 5.

Большое количество тел качения, одновременно воспринимающих радиальную и осевую нагрузку, способствует повышению несущей способности опоры. Расчетная долговечность опоры 1,56 млн км пробега тепловоза в эксплуатации более чем в 1,2 раза превышает долговечность ранее испытанных видов конструкции подшипниковых узлов.

Представленные конструктивные решения моторно-осевого подшипника скольжения и системы его принудительной смазки позволяют повысить долговечность и износостойкость моторно-осевого подшипникового узла локомотивов.

Список литературы

1. Механическая часть тягового подвижного состава [Текст] / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин и др. – М.: Транспорт. 1992. – 440 с.

2. Шаповалов, В. В. Моторно-осевые подшипники скольжения локомотивов с организованной капиллярной системой смазки [Текст] / В. В. Шаповалов, К. С. Ахвердиев, З. А. Мурадов // Электровозостроение: Сб. науч. ст.// ВЭлНИИ. Новочеркасск. – 1992. – С. 201 – 207.

3. Типаж перспективного подвижного состава [Текст] // Локомотив. – 2002. – № 8. – С. 5 – 7.

4. Типаж перспективного подвижного состава [Текст] // Локомотив. – 2002. – № 9. – С. 10, 11.

5. Тепловозы 2ТЭ10М и 3ТЭ10М: Устройство и работа [Текст] / С. П. Филонов, А. Е. Зиборов и др. – М.: Транспорт, 1986. – С. 288.

6. Свидетельство на полезную модель № 27943, МКИ F 16 C 19/00. Подшипниковый узел колесно-моторного блока [Текст] / А. В. Бородин, Д. В. Тарута. Заявл. 17.07.02; Опубл. 27.02.03. Бюл. № 6.

УДК 543.423.1

А. А. Кузнецов, О. Б. Мешкова

ВНУТРИЛАБОРАТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ

В работе рассматривается способ повышения устойчивости градуировочных графиков при проведении анализа металлов и сплавов методом атомно-эмиссионного спектрального анализа. Предлагаются решения для обеспечения требуемого уровня точности при проведении непрерывного контроля в изменяющихся производственных условиях, влияющих на результаты измерений.

Определение количественного состава материалов на предприятиях промышленности и транспорта выполняется для обеспечения производственного процесса при входном контроле приобретаемых материалов, а также на испытаниях готовых изделий с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа (АЭСА). Данный метод позволяет определить содержание элементов и примесей в сплавах с использованием градуировочных графиков, построенных по стандартным образцам.

Для проведения анализа количественного состава выполняют предварительную калибровку спектрального прибора по комплектам стандартных образцов (СО) с известным составом примесей. В результате для каждого материала или группы материалов получают градуировочную зависимость в виде $C = f(I_0)$ или $\lg C = f(\lg I_0)$, где C – количественное содержание анализируемого элемента; $I_0 = I/I_{ср}$ – относительная интенсивность спектральной линии, выражаемая отношением интенсивностей спектральных линий непосредственно анализируемого элемента и линии сравнения (основы материала: *Fe* – для сталей, *Cu* – для бронз и латуней, *Zn* – для цинковых сплавов и т. д.).

Сходимость и воспроизводимость процесса контроля может быть обеспечена благодаря применению внутрилабораторного контроля точности (правильности и прецизионности) проводимых измерений с использованием контрольных карт и показателей процесса. При выдаче конечного результата предлагается дополнять результат контроля параметрами достоверности, характеризующими правильность операций контроля, и показателями воспроизводимости процесса.

Графическим представлением внутрилабораторного анализа могут служить контрольные карты, предложенные Шухартом и примененные в химическом анализе Леви и Дженнингсом [1]. Контрольные карты (КК) являются одним из главных инструментов обеспечения качества технологического процесса, в том числе аналитического контроля, т. е. при их визуальном изучении удается выявить закономерные изменения, которые с трудом обнаруживаются при статистическом анализе.

Эффект от применения КК имеет две составляющие: первая – от непосредственного их внедрения, количественно он зависит от того, насколько правильно построены контрольные карты и насколько правильно интерпретированы относительно выбранных границ регулирования; вторая составляющая – КК являются своеобразным измерительным инструментом с запоминанием состояния аналитического процесса. Периодический анализ КК и использование накопленных данных позволяет наметить направление для коррекции характеристик процесса с целью увеличения его эффективности.

Мерой точности является дисперсия промежуточной прецизионности s^2_I (или соответствующее стандартное отклонение s_I). При записи этих величин рекомендуется указывать, какие именно факторы изменяются. Всего рассматриваются четыре фактора (время T, калибровка C, оператор O, оборудование M). При проведении количественного определения состава материалов от подгруппы к подгруппе изменяются время и калибровка.

Случайная погрешность измерений, характеризующая разброс результатов между подгруппами, называется «промежуточная прецизионность при различиях по факторам «время»

и «калибровка»», а мерой ее является дисперсия промежуточной прецизионности (при различиях по факторам «время» и «калибровка») $s^2_{I(T,C)}$ (или соответствующее стандартное отклонение $s_{I(T,C)}$).

Точность анализа характеризуется рассеянием результатов анализа относительно их среднего значения. При оценке точности нужно указывать: внутрилабораторную ошибку воспроизводимости, полученную в пределах одной лаборатории на одном комплекте оборудования за короткий промежуток времени; внутрилабораторную ошибку, характеризующую рассеяние относительно среднего, полученного за длительное время; межлабораторную ошибку воспроизводимости, полученную на разных приборах в разных лабораториях.

Алгоритм исследования, ориентированный на обработку результатов измерений, может быть представлен в виде последовательности следующих основных этапов:

накопление статистических данных контроля количественного состава;

структуризация массива данных в виде гистограмм и полигонов;

аппроксимация полигонов табулированной функцией распределения;

интерпретация результатов с указанием показателей достоверности и возможностей процесса контроля.

Проблема обеспечения точности и достоверности аналитических данных при исследовании состава конструкционных материалов требует знания закономерностей распределения результатов и погрешностей анализа в аналитических интервалах методик измерений.

Результаты собственного накопленного материала (данные анализа материалов спектральных лабораторий ОАО «АК «Омскагрегат», ФГУП ОМО им. Баранова, ОАО «Радиозавод им. Попова» (РЕЛЕРО), а также анализ публикаций, посвященных данному вопросу, дают основание утверждать, что установлены общие закономерности формы функций распределения результатов в аналитических интервалах самых разнообразных методик определения элементного (компонентного) состава. Анализ статистических данных в исследовательской работе выполнен в программе *STATISTICA* и приложениях программы *MS Excel*.

В производственных условиях на процесс измерения количественного состава воздействует совокупность влияющих факторов, учесть которые сложно, поскольку они носят случайный характер. Успешное осуществление атомно-эмиссионного спектрального анализа предполагает изолированность, равновесность и стационарность самой системы проведения анализа. Фактически при эмиссионном анализе его начальные этапы – испарение и возбуждение атомов пробы, отбор определенной доли светового потока – не могут осуществляться в стационарном режиме из-за нестабильности влияющих факторов, которыми в том числе могут быть форма электродов и межэлектродный промежуток при их выгорании, колебания силы тока, подаваемого на электроды, времени обжига и экспозиции, отклонения геометрических параметров входной щели спектрометра и т. д. [2].

Под действием указанных факторов градуировочные графики изменяют свое положение, которое выражается в смещении и изменении угла наклона, в случае линейной аппроксимации (рисунок 1). В данном случае коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}362$.

Смещение калибровочных графиков проиллюстрировано в частности в таблице 1 и на рисунке 1, в которых представлены результаты спектрального анализа многократных исследований одних и тех же стабильных и однородных образцов в течение длительного времени (диапазон содержания *Al* в ЦАМ 4-1 (ГОСТ 19424-97): (3,5 – 4,3) %; ОСКО сходимости 0,02.

Построенные КК систематических погрешностей, средних значений, текущих расхождений и размахов показали нестабильность процесса контроля (выбросы за контрольные пределы, наличие трендов и других контрольных признаков). В данном случае, как это чаще всего бывает при спектральном анализе, выполняется перекалибровка оборудования, что приводит к остановке процесса контроля и к неоправданным экономическим затратам.

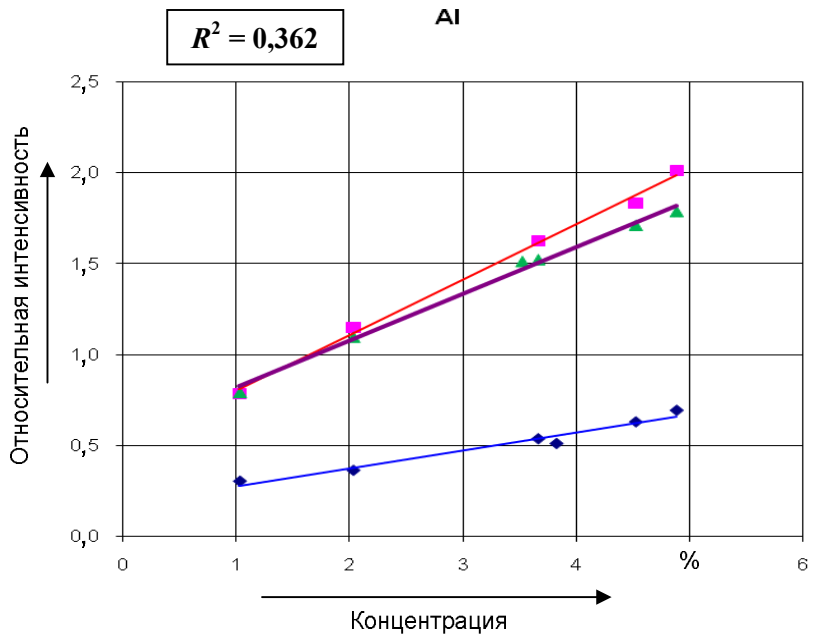


Рисунок 1 – Градуировочный график *Al* (308,22 нм), линия сравнения *Zn* (307,59 нм)

Контрольные карты систематических погрешностей и размахов для данных таблицы 1 приведены на рисунках 2 и 3.

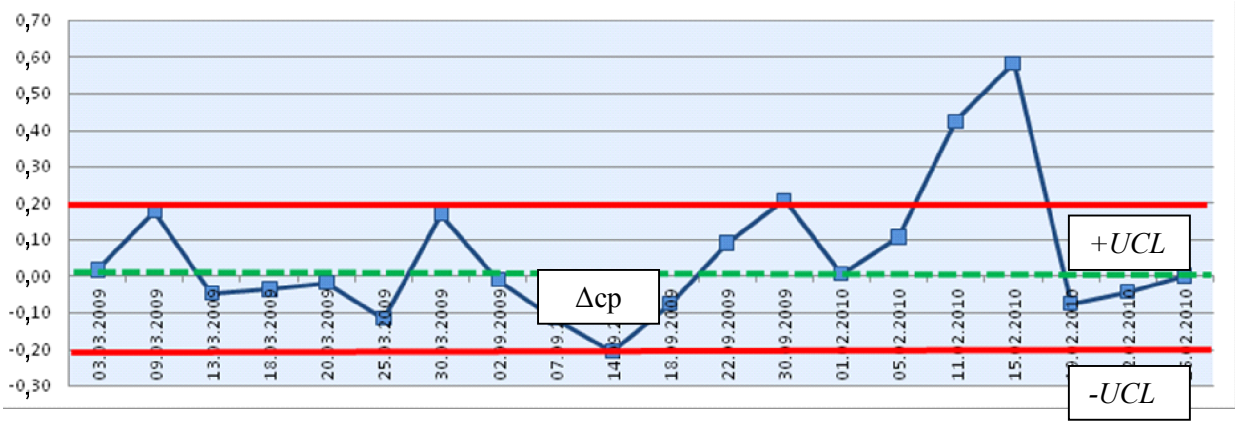


Рисунок 2 – Контрольная карта систематических погрешностей, стандартная калибровка

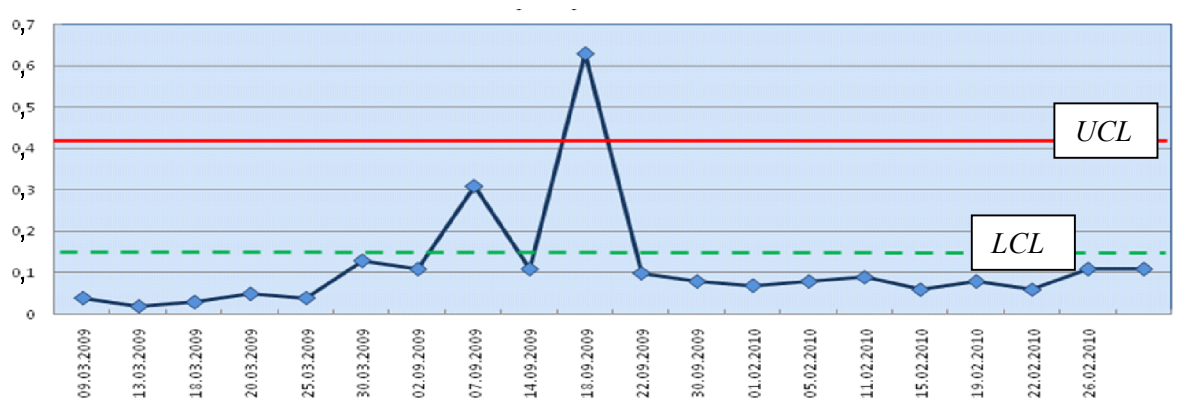


Рисунок 3 – Контрольная карта размахов, стандартная калибровка

Таблица 1 – Данные проверки концентрации *Al* (C_0 = 3,82 %) в контрольном образце 672 сплава ЦАМ4-1 при традиционной калибровке

Дата поверки	Результат измерения и погрешности								Примечание
	C_1	C_2	C_3	$C_{ср}$	Стек	СКО	R	Δ_c	
03.03.2009	3,82	3,86	3,83	3,84	0,16	0,02	0,04	0,02	Превышает контр. признак – требуется перекалибровка
09.03.2009	3,99	4,01	3,99	4,00	0,22	0,01	0,02	0,18	
13.03.2009	3,79	3,76	3,77	3,77	0,01	0,02	0,03	-0,05	
18.03.2009	3,76	3,78	3,81	3,78	0,02	0,03	0,05	-0,04	
20.03.2009	3,8	3,78	3,82	3,80	0,10	0,02	0,04	-0,02	
25.03.2009	3,78	3,68	3,65	3,70	0,29	0,07	0,13	-0,12	
30.03.2009	4,05	3,98	3,94	3,99	0,18	0,06	0,11	0,17	
02.09.2009	3,67	3,78	3,98	3,81	0,11	0,16	0,31	-0,01	Превышает контр. признак – требуется перекалибровка
07.09.2009	3,68	3,77	3,66	3,70	0,09	0,06	0,11	-0,12	
14.09.2009	3,43	4,02	3,39	3,61	0,13	0,35	0,63	-0,21	Превышает контр. признак – требуется перекалибровка
18.09.2009	3,75	3,69	3,79	3,74	0,17	0,05	0,1	-0,08	
22.09.2009	3,87	3,95	3,91	3,91	0,12	0,04	0,08	0,09	
30.09.2009	4,03	3,99	4,06	4,03	0,20	0,04	0,07	0,21	
01.02.2010	3,82	3,87	3,79	3,83	0,10	0,04	0,08	0,01	
05.02.2010	3,98	3,89	3,91	3,93	0,15	0,05	0,09	0,11	
11.02.2010	4,07	4,09	4,08	4,08	0,00	0,01	0,02	0,26	
15.02.2010	4,06	4,08	4,09	4,08	0,33	0,02	0,03	0,26	
19.02.2010	3,75	3,77	3,71	3,74	0,03	0,03	0,06	-0,08	
22.02.2010	3,78	3,83	3,72	3,78	0,04	0,06	0,11	-0,04	
26.02.2010	3,83	3,87	3,76	3,82		0,06	0,11	0,00	

Для обеспечения инвариантности градуировочных графиков и обеспечения стабильности процесса контроля методом АЭСА предлагается вместо относительной интенсивности I_0 использовать функцию, аргументами которой кроме линии анализируемого элемента являются несколько линий сравнения, имеющих различные параметры яркости и потенциалов возбуждения – $F(I, I_{ср1}, I_{ср2}, I_{ср3})$:

$$F = \frac{a_0 I_0}{a_1 I_{ср1} + a_2 I_{ср2} + a_3 I_{ср3}},$$

где I_0 – интенсивность спектральной линии анализируемого элемента;

$I_{ср1}$, $I_{ср2}$, $I_{ср3}$ – интенсивность линий сравнения с различными энергетическими показателями; a_0, a_1, a_2, a_3 – весовые коэффициенты [3]. Применение данного метода позволило существенно стабилизировать градуировочные графики – коэффициент детерминации R^2 = 0,981 (рисунок 4).

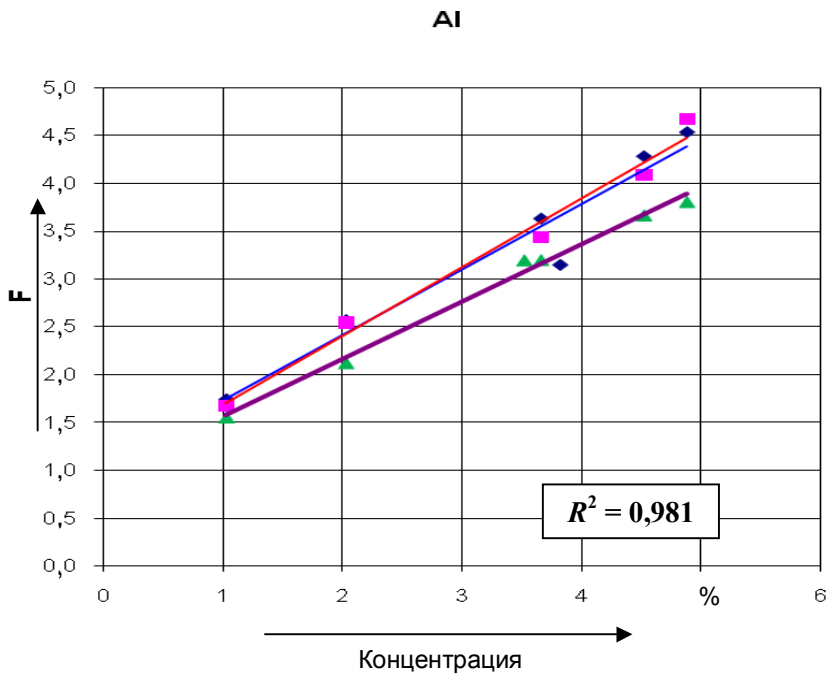


Рисунок 4 – Градуировочный график *Al* (308,22 нм), линии сравнения *Zn* (301,84; 307,25; 307,59 нм)

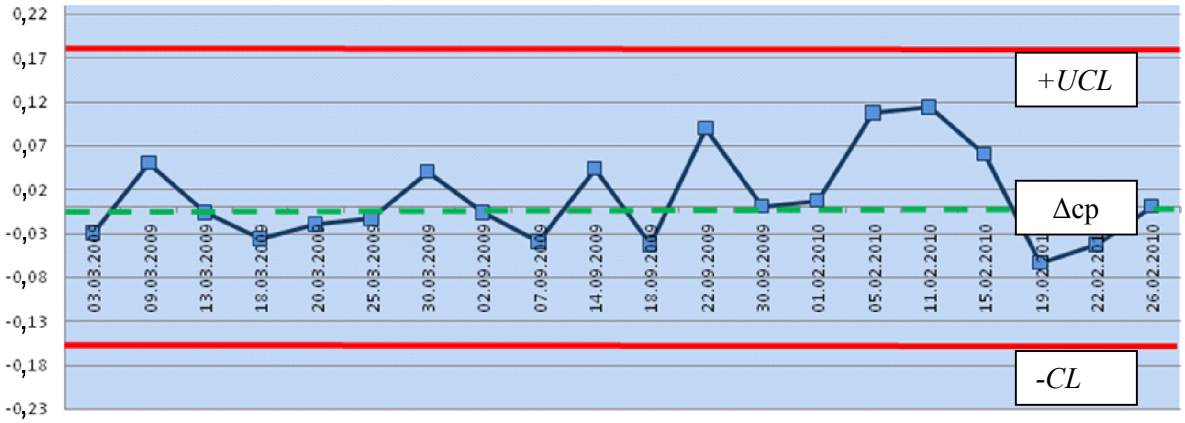


Рисунок 5 – Контрольная карта систематических погрешностей, устойчивая калибровка

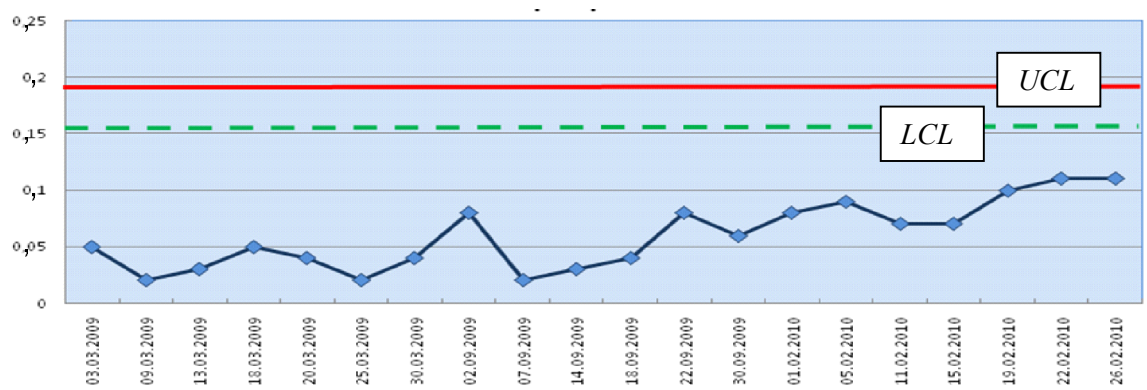


Рисунок 6 – Контрольная карта размахов, устойчивая калибровка

Кроме того, исследовались контрольные карты средних значений и текущих расхождений. Обработка результатов измерений при использовании указанного метода (таблица 2) и построенные КК (рисунки 5, 6) указывают на увеличение стабильности процесса контроля.

Таблица 2 – Расчетная концентрация *Al* (C_0 = 3,82 %) в контрольном образце 672 сплава ЦАМ4-1 при калибровке методом устойчивых графиков

Дата поверки	Результат измерения и погрешности							
	C_1	C_2	C_3	$C_{ср}$	Стек	СКО	Δ_c	R
03.03.2009	3,82	3,78	3,77	3,79	0,08	0,03	-0,03	0,05
09.03.2009	3,86	3,87	3,88	3,87	0,06	0,01	0,05	0,02
13.03.2009	3,8	3,83	3,81	3,81	0,03	0,02	-0,01	0,03
18.03.2009	3,76	3,78	3,81	3,78	0,02	0,03	-0,04	0,05
20.03.2009	3,8	3,78	3,82	3,80	0,01	0,02	-0,02	0,04
25.03.2009	3,8	3,82	3,8	3,81	0,05	0,01	-0,01	0,02
30.03.2009	3,86	3,88	3,84	3,86	0,05	0,02	0,04	0,04
02.09.2009	3,8	3,78	3,86	3,81	0,03	0,04	-0,01	0,08
07.09.2009	3,78	3,77	3,79	3,78	0,08	0,01	-0,04	0,02
14.09.2009	3,88	3,85	3,86	3,86	0,09	0,02	0,04	0,03
18.09.2009	3,75	3,79	3,79	3,78	0,13	0,02	-0,04	0,04
22.09.2009	3,87	3,95	3,91	3,91	0,09	0,04	0,09	0,08
30.09.2009	3,85	3,79	3,82	3,82	0,01	0,03	0,00	0,06
01.02.2010	3,82	3,87	3,79	3,83	0,10	0,04	0,01	0,08
05.02.2010	3,98	3,89	3,91	3,93	0,01	0,05	0,11	0,09
11.02.2010	3,95	3,96	3,89	3,93	0,05	0,04	0,11	0,07
15.02.2010	3,84	3,91	3,89	3,88	0,10	0,04	0,06	0,07
19.02.2010	3,75	3,81	3,79	3,78	0,01	0,03	-0,04	0,06
22.02.2010	3,78	3,83	3,72	3,78	0,04	0,06	-0,04	0,11

В ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 рассматриваются два вида событий, свидетельствующих о нестабильности процесса измерений: превышение «предела предупреждения» (*LCL*) и превышение «предела действия» (*UCL*). При этом используем термины, отсутствующие в ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 – «контрольный признак» и «тревожный признак». «Контрольный признак» – это событие, свидетельствующее о выходе процесса из статистически контролируемого состояния с доверительной вероятностью, превышающей ~0,99, и требующее остановки исследований и коррекции процесса измерений. Строго говоря, после коррекции необходимо повторно исследовать рутинные пробы. «Тревожный признак» – это событие, свидетельствующее о выходе процесса из статистически контролируемого состояния с доверительной вероятностью ~(0,95 – 0,99); при этом остановки измерений не требуется [4].

В качестве «контрольных признаков» используются следующие правила:

1) R(3σ) – расхождение (размах) больше верхнего (или меньше нижнего) предела действия (используется в ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002);

2) 2R(2σ) – расхождение (размах) для двух последних подгрупп больше верхнего (или меньше нижнего) предела предупреждения.

В качестве «тревожных признаков» рассматриваются следующие правила:

1) *1(2σ)* – последняя точка лежит выше контрольного предела $(\overline{\overline{Y}}+2\sigma)$ или ниже него $(\overline{\overline{Y}}-2\sigma)$;

2) *2(1σ)* – две или три последовательных точки, включая последнюю, лежат выше контрольного предела $(\overline{\overline{Y}}+1\sigma)$ или ниже него $(\overline{\overline{Y}}-1\sigma)$;

3) $7(\overline{\overline{Y}})$ – семь или более последовательных точек, включая последнюю, лежат выше (или ниже) среднего значения $\overline{\overline{Y}}$;

4) *4D* – каждая из четырех и более последовательных точек, включая последнюю, лежит выше (положительный дрейф) или ниже (отрицательный дрейф) предыдущей.

Если хотя бы один из этих признаков выявлен, то процесс измерений вышел из-под контроля. Необходимо повторить последние исследования после выявления и устранения источника выявленной погрешности. Контрольные карты Шухарта весьма информативны. Отметим, что то, какой именно контрольный признак выявлен, является указанием на тип происшедшего события (скачок, сдвиг, дрейф и т. д.).

При помощи карт Шухарта показано, что для одного и того же набора данных с использованием математической обработки в виде функции стабилизации *F* уменьшены составляющие погрешностей, процесс стабилизируется во времени, длительное время не требуется перекалибровка спектрометров.

На основании приведенного материала можно сделать выводы.

1. Разработана многопараметровая функция, использующая несколько линий сравнения, имеющих различные энергетические характеристики, что позволяет повысить инвариантность по отношению к условиям проведения эксперимента.

2. Применение многопараметровой функции позволило повысить стабильность процесса контроля и уменьшить погрешности от изменения параметров градуирования (коэффициент детерминации R^2 градуировочных графиков увеличился от 0,362 до 0,981), что уменьшает время проведения рекалибровок по стандартным образцам.

3. При помощи контрольных карт Шухарта доказано повышение различных составляющих точности спектрального анализа материалов методом атомно-эмиссионной спектроскопии. С помощью контрольной карты систематических погрешностей установлено, что систематическая погрешность уменьшилась в среднем с 15,2 до 3,2 %, а на данных карты размахов – что относительная погрешность снизилась с 11,3 до 2,6 %.

Список литературы

1. Дворкин, В. И. Метрология и обеспечение качества химического анализа [Текст] / В. И. Дворкин. – М.: Химия. – 2001. – 263 с.

2. Нагибина, И. М. Фотографические и фотоэлектрические спектральные приборы и техника спектроскопии [Текст] / И. М. Нагибина, Ю. К. Михайловский. – М.: Машиностроение, 1981. – 246 с.

3. Кузнецов, А. А. Способ достижения инвариантности градуировочных графиков при определении количественного состава металлов и сплавов автоматизированными системами АЭСА. [Текст] / А. А. Кузнецов, О. Б. Мешкова, Д. Е. Зачатейский // Омский научный вестник. – 2010. – № 2. – С. 169 – 172.

4. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 65 с.

УДК 629.45.048

Ю. И. Матяш, О. С. Томилова

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ В ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДАХ ДАЛЬНЕГО СЛЕДОВАНИЯ

В статье рассмотрена проблема очистки воды в пассажирских вагонах дальнего следования, пути решения по обеззараживанию воды, предложены устройства для обработки воды ультрафиолетовым излучением.

Молекулы воды содержат две равные друг другу полярные связи О-Н, которые образуют между собой валентный угол 105°3'. Вследствие этого у молекулы воды есть значительный дипольный момент. Именно благодаря наличию химической (О-Н) и водородной связи вода является, с одной стороны, растворителем многих веществ, а с другой – в ней может обитать множество микроорганизмов. Повышение температуры до +45°С и наличие контакта воды с воздухом окружающей среды способствует интенсивному размножению болезнетворных микроорганизмов, которые способны вызывать различные виды заболеваний, такие как тиф, гепатит и пр. В связи с этим вода, употребляемая человеком, должна подвергаться глубокой очистке и обеззараживанию [1, 2].

Особенно актуальна проблема очистки воды в пассажирских поездах в пути дальнего следования. В общем случае в составе воды в заправочных баках пассажирского подвижного состава выявляются такие микроорганизмы, как колиформные бактерии, бактерии рода Pseudomonas (Ps.aeruginosa), Acinetobacter, легионеллы, яйца гельмитов, вирусы и др.

В отечественной практике пассажирские поезда дальнего следования оборудованы самотечной системой холодного и горячего водоснабжения. Объем системы составляет около 1000 л из расчета примерно 20 л на одного человека в сутки с интервалом между заправками и пополнением системы до 12 ч.

Система водоснабжения включает в себя бак для хранения запасов воды, расположенный в верхней части вагона, разводящие трубопроводы, разобщительные и спускные вентили и краны. Заправка бака водой осуществляется через заправочные патрубки, которые подсоединены к наливному шлангу водоразборной колонки на станционных путях. В заправочных колонках, расположенных на станционных путях, питьевая вода, как правило, отвечает санитарным нормам [1, 2], но в процессе заправки и транспортировки вода в пассажирских вагонах может быть подвержена вторичному загрязнению. Причинами вторичного загрязнения являются нарушение правил хранения, эксплуатации наливных шлангов и загрязнение внутренних поверхностей баков, где находятся запасы воды и разводящих трубопроводов. Вторичному загрязнению вода подвержена особенно в летний период года, так как при высокой температуре начинает интенсивно развиваться жизнедеятельность микроорганизмов.

В отечественной и зарубежной практике, применительно к пассажирскому подвижному составу, существуют следующие способы удаления вторичного загрязнения воды: хлорирование, озонирование, обеззараживание с помощью жидкого диоксида углерода, метод ультрафиолетового излучения.

Из анализа зарубежных и отечественных методов очистки воды следует, что метод хлорирования характеризуется рядом недостатков, таких как повторное обмывание, повторный химический анализ воды после хлорирования, повышенные требования к транспортировке и хранению, а также наличие хлорамина, который присутствует в составе хлора и подвергает коррозии всю систему водоснабжения пассажирского вагона. Кроме того, хлорирование не уничтожает спорообразующие бактерии и не предотвращает образование побочных продуктов, которые приводят к появлению у воды специфических запаха и вкуса.

Наиболее эффективным в настоящее время является метод УФ-излучения, который имеет следующие преимущества:

1) ультрафиолетовое облучение эффективно воздействует на большинство водных бактерий, вирусов, спор, которые являются возбудителями таких инфекционных болезней, как тиф, холера, дизентерия, вирусный гепатит, полиомиелит и др. Применение ультрафиолета позволяет добиться более эффективного обеззараживания в отношении вирусов;

2) обеззараживание ультрафиолетом происходит за счет фотохимических реакций внутри микроорганизмов, поэтому на эффективность изменения характеристик воды оно оказывает намного меньшее влияние, чем обеззараживание химическими реагентами. В частности, на воздействие ультрафиолетового излучения на микроорганизмы не влияют pH и температура воды;

3) при правильной обработке ультрафиолетовым излучением в воде не обнаруживаются токсичные и мутагенные соединения, оказывающие негативное влияние на биоценоз водоемов;

4) в отличие от окислительных технологий в случае передозировки отсутствуют отрицательные эффекты. Это позволяет значительно упростить контроль за процессом обеззараживания и не проводить анализы на определение содержания в воде остаточной концентрации дезинфектанта;

5) достижения последних лет в светотехнике и электротехнике позволяют обеспечить высокую степень надежности УФ-комплексов. Современные УФ-лампы и пускорегулирующая аппаратура к ним выпускаются серийно, имеют высокий эксплуатационный ресурс;

6) для обеззараживания ультрафиолетовым излучением характерны более низкие, чем при хлорировании и тем более при озонировании, эксплуатационные расходы; отсутствует потребность в дорогостоящих реагентах (жидком хлоре, гипохлорите натрия или кальция), нет необходимости в реагентах для дехлорирования;

7) отсутствует необходимость создания складов токсичных хлорсодержащих реагентов, требующих соблюдения специальных мер технической и экологической безопасности, что повышает надежность систем водоснабжения и канализации в целом;

8) ультрафиолетовое оборудование компактно, требует минимальных площадей, его внедрение возможно в действующие технологические процессы очистных сооружений без их остановки, с минимальными объемами строительно-монтажных работ [3].

Обеззараживание воды осуществляется с помощью УФ-стерилизатора, который служит для обеззараживания воды от бактерий, грибов, вирусов и простейших микроорганизмов, многие из которых являются патогенными и представляют прямую угрозу для здоровья и жизни водных обитателей и оказывают неблагоприятное воздействие на состояние питьевой воды.

Основным элементом УФ-установки (рисунок 1) является камера обеззараживания, изготовленная из пищевой нержавеющей стали. Внутри камеры располагаются бактерицидные лампы, заключенные в прочные кварцевые чехлы, которые исключают контакт УФ-лампы с водой. Количество ламп и их расположение определяются производительностью установки, а также типом и качеством обрабатываемой воды. На камере находятся подводящие и отводящие патрубки, смотровое окно, УФ-датчик и другие элементы. Система автоматики располагается на выносном пульте управления.

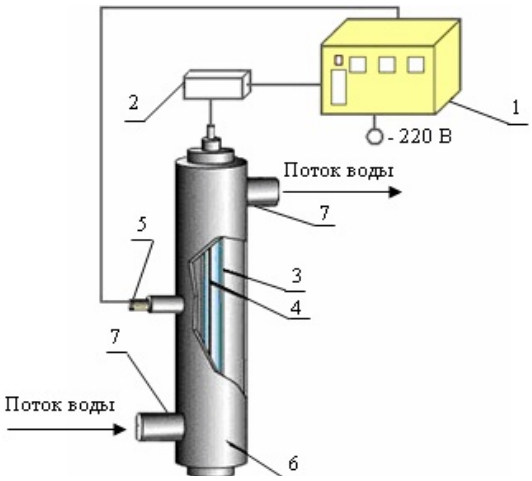


Рисунок 1 – Принципиальная схема УФ-установки: 1 – пульт управления; 2 – пускорегулируемая аппаратура; 3 – кварцевый чехол; 4 – УФ-лампа; 5 – УФ-датчик; 6 – стальной корпус; 7 – патрубки

Принцип действия УФ-стерилизатора следующий: вода под давлением, создаваемым заправочным шлангом, проходит через стерилизатор, где происходит процесс обеззаражи-

вания, после этого вода с комочками коагулированных микроорганизмов подается в проточный фильтр, где происходит процесс механической очистки воды.

Для более эффективного обеззараживания питьевой воды [4] предложена система обеззараживания воды в пассажирском вагоне (рисунок 2), где вода при заправке под давлением проходит через фильтры 5, 4, обеззараживается в УФ-стерилизаторе 3, затем очищается от коагулированных микроорганизмов в фильтре 2 и попадет в бак холодного водоснабжения. Внутренние поверхности бака имеют высокую отражательную способность.

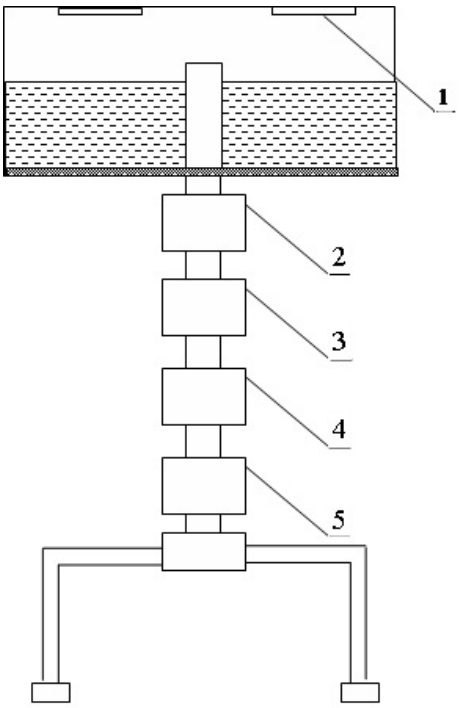


Рисунок 2 – Система обеззараживания воды в пассажирском вагоне
1 – стерилизатор на основе УФ-излучения; 2 – фильтр для коагулированных микроорганизмов; 3 – УФ-стерилизатор; 4 – угольный фильтр тонкой очистки; 5 – фильтр грубой очистки

Зная время заправки бака холодного водоснабжения пассажирского вагона, которое составляет 6 – 8 мин, а также его вместимость 1000 л, можно определить потребную производительность УФ-стерилизатора, необходимую для данного вагона, м^3/ч:

$$F = \frac{V_б}{t},$$

где $V_б$ – объем бака пассажирского вагона – 1000 л (1,0 м^3);

t – время заправки вагона на станции.

Минимально допустимое время заправки вагона – 6 мин (0,10 ч).

$$F = \frac{1,0}{0,10} = 10 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Исходя из полученных результатов можно выбрать существующий УФ-стерилизатор для обеззараживания воды в пассажирском вагоне согласно данным таблицы в работе [1].

Технические характеристики УФ-стерилизаторов

Тип установки	Производительность, м^3/ч	Потребляемая мощность, Вт	Вес, кг	Габаритные размеры, мм	Диаметр патрубков
ODV-5	5	80	15	1110×120×220	2”
ODV-7	7	95	18	1350×120×220	2”
ODV-10	10	180	25	1120×180×280	2”
ODV-15	15	220	32	1350×180×280	2”

Потребляемая мощность необходимого УФ-стерилизатора составляет 180 Вт. С учетом того, что обеззараживание воды осуществляется в режиме стоянки и вагонные энергопотребители запитаны от аккумулятора, мощность в 180 Вт меньше мощности сети освещения лампами накаливания (0,6 кВт). Решение вопросов оптимизации конструкции и энергопотребления УФ-стерилизатора является актуальной задачей.

На рисунке 3 представлено разработанное устройство для обработки воды ультрафиолетовым излучением [5], обеспечивающее высокоэффективную очистку воды от микроорганизмов.

Устройство содержит полую цилиндрическую оболочку 8 с основаниями 16, 4 и соединенные с ней патрубки 12, 7, для подвода исходной и отвода обработанной воды, ультрафиолетовую лампу 5 в кварцевом чехле 6, концентрично установленную в полой цилиндриче-

ской оболочке 8, питающий блок 1, соединенный электрически силовым проводом 2 с выводами 3, 14 и проводом 13, проходящим по поверхности ультрафиолетовой лампы 5, при этом на основаниях размещены узлы крепления ультрафиолетовой лампы, один из которых выполнен в виде фланца 11 с двумя втулками, через который проходит уплотненный питающий силовой провод 2, соединенный с ее выводами 3, а другой выполнен в виде подпружиненных упругих лепестков 15, причем на наружной втулке фланца 11 установлен с возможностью фиксации стакан 10, на котором закреплен узел уплотнения 9 питающего силового провода 2, а во внутреннюю втулку фланца 11 герметично установлен открытый конец кварцевого чехла 6, причем упомянутые выше патрубки расположены по касательной.

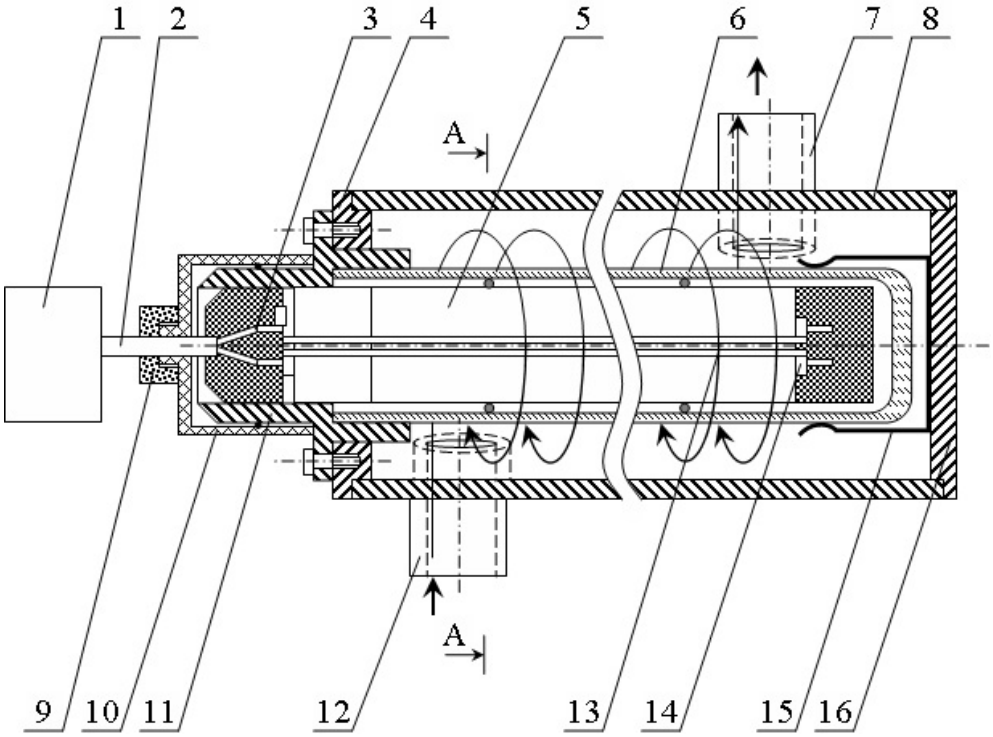


Рисунок 3 – Схема устройства для обработки воды ультрафиолетовым излучением:
1 – питающий блок; 2 – питающий силовой провод; 3 , 14 – выводы; 4, 16 – основания; 5 – ультрафиолетовая лампа; 6 – кварцевой чехол; 7, 12 – патрубки; 8 – цилиндрическая оболочка; 9 – узел уплотнения; 10 – стакан; 11 – фланец; 13 – провод; 15 – подпружиненные упругие лепестки

Работа предложенного устройства происходит следующим образом. Ультрафиолетовая лампа 5 получает электрическую энергию от питающего блока 1 через силовой провод 2, проходящий через узел уплотнения 9 и стакан 10, и внутренний провод 13, соединенный соответственно с выводами 3, 14. Ультрафиолетовая лампа 5 расположена внутри кварцевого чехла 6, который закреплен на основаниях 16, 4 с помощью узлов крепления 15, 11. Вода поступает в устройство стерилизации воды через водоналивной патрубок 12, соединенный с полой цилиндрической оболочкой 8, с основаниями 16, 4, и выходит через патрубок 7. Вследствие смещения патрубка 12 в крайнее положение относительно центра корпуса вода приобретает тангенциальное движение относительно ультрафиолетовой лампы 5, установленной в кварцевом чехле 6, увеличивая путь прохождения воды по кварцевому чехлу 6, время контакта воды с ультрафиолетовым стерилизатором, а следовательно, и качество обработки.

Внедрение устройств существенно повышает качество воды при заправке пассажирских вагонов и исключает возможность вторичного ее загрязнения в процессе движения поездов дальнего следования [4, 5].

Список литературы

1. ГОСТ 51232-98. Вода питьевая. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 40 с.
2. СанПиН 2.14.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Изд-во стандартов. – 2001. – 45 с.
3. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение [Текст] / Н. Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1974. – 480 с.
4. Патент РФ на полезную модель № 90064 МПК C 02 F 1/00. Обеззараживатель воды / А. Н. Головаш, А. П. Семенов, Ю. И. Матяш, В. К. Кучеренко, С. И. Подоляк, О. С. Мотовилова. – № 2009133812/22; Заявл. 08.09.2009; Опубл. 27.12.2009 // Открытия. Изобретения. 2009. – № 36. – 6 с.
5. Патент РФ на полезную модель № 88327, МКИ B 61 D 35/00. Устройство для обработки воды ультрафиолетовым излучением / Ю. И. Матяш, О. С. Мотовилова. – № 2009127016/22; Заявл. 14.07.2009; Опубл. 10.11.2009 // Открытия. Изобретения. – 2009. № 31. – 6 с.

УДК 621.436:629.424.1

Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов, Ю. Б. Гришина

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДИЗЕЛЯ

Приводятся данные по определению пределов изменения продолжительности сгорания и показателя характера сгорания при моделировании теплового расчета дизельного двигателя методом Вибе. Дан анализ влияния продолжительности сгорания и показателя характера сгорания на параметры процесса сгорания и индикаторные показатели работы дизеля.

Наиболее объективным критерием для оценки рабочего цикла двигателя служит индикаторная диаграмма, по которой можно судить об основных показателях рабочего цикла: работе, КПД, максимальном давлении, быстроте нарастания давления и др.

Сгорание является одним из главных процессов, влияющих на основные показатели рабочего цикла, поэтому важно выяснить, в каком направлении должен быть усовершенствован процесс сгорания, чтобы получить индикаторную диаграмму с наилучшими показателями, т. е. получить оптимальный рабочий цикл.

Для описания процесса сгорания удобно использовать уравнение Вибе [1]:

$$x = 1 - e^{\ln(1-x_z)\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}},$$

где x_z – доля топлива, сгорающего к моменту практического конца реакции; $\frac{\varphi}{\varphi_z}$ – отвлеченное время сгорания; φ – угол поворота коленчатого вала; φ_z – продолжительность сгорания, выраженная в углах поворота коленчатого вала; m – показатель характера сгорания, параметр, отображающий характер изменения во времени относительной плотности эффективных центров в процессе сгорания.

Опытные данные по сгоранию топлива в дизелях, приведенные в работе [1], соответствуют закономерности скорости сгорания топлива. Во всех рассмотренных случаях опытная проверка приведенного выше уравнения показала его несомненную пригодность для описания развития во времени процессов сгорания в дизелях.

Для выяснения влияния на показатели рабочего цикла дизеля продолжительности сгорания φ_z было рассчитано 24 рабочих цикла для шести значений продолжительности сгорания φ_z – 20, 40, 60, 80, 100 и 120° при постоянных, близких к расчетным значениям, коэффициенте избытка

воздуха в цилиндре α и угле опережения подачи топлива $\varphi_{оп}$. В таблице 1 приведены значения параметров работы дизеля 1А-5Д49, его системы наддува и рабочего тела на линии сжатия до момента воспламенения.

Таблица 1 – Параметры работы дизеля на линии сжатия

Параметр работы дизеля	Значение параметра
Эффективная мощность дизеля, кВт	2206
Частота вращения вала дизеля, мин$^{-1}$	1000
Коэффициент избытка воздуха	2,0
Давление начала сжатия, МПа	0,216
Температура начала сжатия, К	364
Давление воздуха в момент подачи топлива, МПа	4,39
Температура воздуха в момент подачи топлива, К	820
Угол опережения подачи топлива (фактический), °п.к.в.	19
Период задержки воспламенения, °п.к.в.	10
Давление конца «чистого» сжатия, МПа	6,05
Температура конца «чистого» сжатия, К	887
Угол конца «чистого» сжатия, °п.к.в.	9

На рисунке 1 приведены диаграммы изменения за цикл давления, температуры и доли сгоревшего топлива при неизменных значениях коэффициента воздуха α = 2,0 и фактическом угле опережения подачи топлива $\varphi_{оп}$ = 19°п.к.в.

Продолжительность сгорания оказывает существенное влияние на линию сгорания (рисунок 1, а). Наклон линии «видимого» сгорания (от точки начала сгорания до точки максимального давления сгорания p_{max}) с увеличением φ_z значительно уменьшается, при этом резко снижается p_{max} и увеличивается угол поворота коленчатого вала от в.м.т. до точки p_{max}.

В таблице 2 приведены значения показателей рассматриваемых циклов.

Таблица 2 – Зависимость показателей рабочего цикла дизеля от продолжительности сгорания топлива

Показатели рабочего цикла	Продолжительность сгорания топлива φ_z, град.						Экспериментальны данные
	20	40	60	80	100	120	
Среднее индикаторное давление, МПа	1,624	1,565	1,497	1,469	1,440	1,429	1,430
Индикаторный КПД.	0,521	0,502	0,480	0,471	0,462	0,458	0,468
Удельный индикаторный расход топлива, кг/(кВт·ч)	0,160	0,166	0,174	0,177	0,181	0,182	0,181
Максимальное давление сгорания, МПа	16,81	13,67	11,06	10,97	10,9	11,33	11,5
Угол поворота коленчатого вала $\alpha_р$ от в.м.т. до точки p_{max}, град.	4	10	12	10	9	8	–
Максимальная температура сгорания, К	2290	2106	1929	1848	1790	1782	–
Угол поворота коленчатого вала $\alpha_Т$ от в.м.т. до точки T_{max}, град.	6	17	26	27	27	24	–
$\alpha_Т - \alpha_р$, град.	2	7	14	17	18	16	–
Температура конца сгорания, К	2252	1920	1663	1470	1345	1254	–
Давление конца сгорания, МПа	14,77	7,14	3,50	2,00	1,33	0,99	–
Коэффициент эффективности сгорания	0,794	0,765	0,772	0,712	0,669	0,610	0,70 – 0,85
Показатель характера сгорания	1,0	1,0	1,0	0,6	0,4	0,2	–

Из данных таблицы 2 видно, что наилучшие значения показателей p_i, η_i и b_i получаются при φ_z= 20 – 80 °, а при больших значениях φ_z эти показатели ухудшаются. Из таблицы 2 видно также, что T_{max} с ростом продолжительности сгорания уменьшается, а соответствующий угол α_T увеличивается. Температура T_z и давление p_z конца сгорания с ростом φ_z уменьшаются.

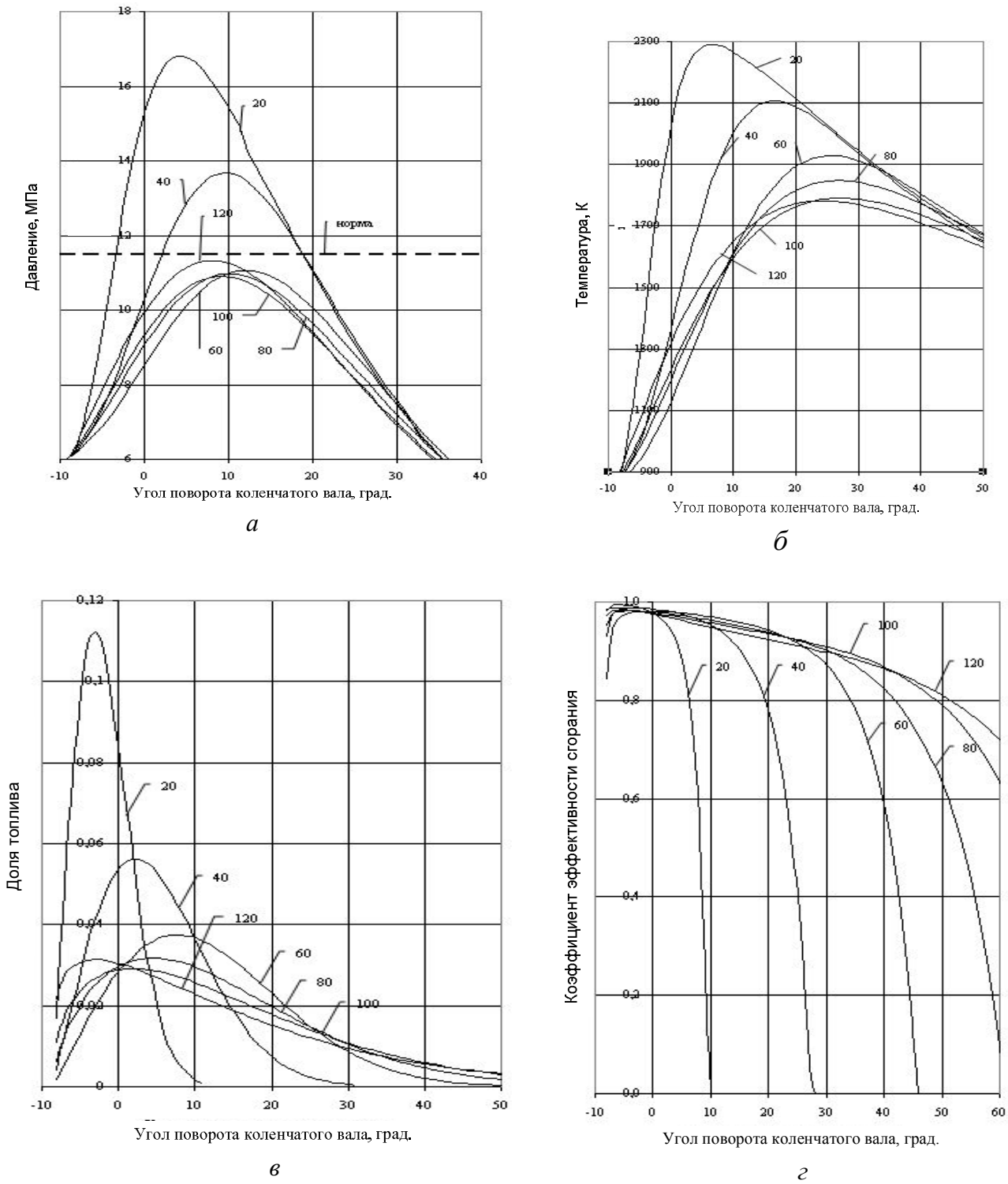


Рисунок 1 – Диаграммы давления (а), температуры газов (б), хода выгорания топлива (в) и коэффициента эффективности сгорания (г) в цикле по углу поворота коленчатого вала для продолжительности сгорания φ_z

Однако следует принять во внимание, что для $\varphi_z = 20 – 40°$ значение максимального давления сгорания существенно отличается от известных экспериментальных данных [2, 3]. К тому же маловероятно, что при $\varphi_z = 20 – 40$ ° можно будет достигнуть таких значений показателей p_i, η_i и b_i при прочих неизменных условиях. Для продолжительности сгорания $\varphi_z = 100 – 120$ ° для номинального режима работы дизеля коэффициент эффективности сгорания оказывается низким (менее 0,7), что также не согласуется с известными экспериментальными данными [2, 3]. Анализируя данные таблицы 2, приходим к выводу, что более ве-

роятной продолжительностью сгорания следует считать величину, находящуюся в интервале 50 – 90 °.

Чтобы выяснить влияние на показатели рабочего цикла дизеля показателя характера сгорания m, были рассчитаны рабочие циклы для значений m = 0 – 1 с шагом 0,2 при постоянных, близких к расчетным значениям, коэффициенте избытка воздуха в цилиндре α и угле опережения подачи топлива $\varphi_{оп}$.

На рисунке 2 приведены расчетные диаграммы рабочих циклов дизеля.

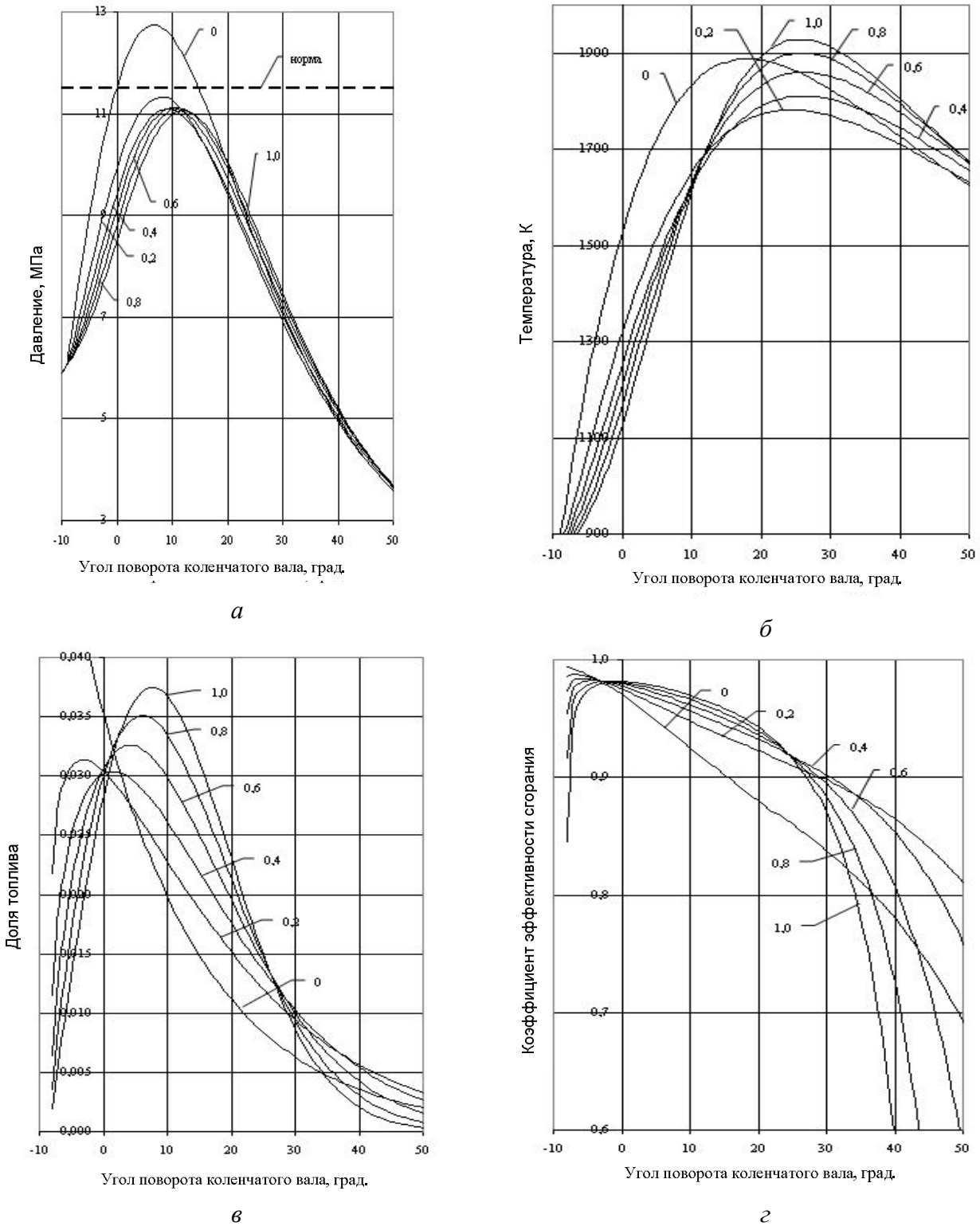


Рисунок 2 – Диаграммы давления (а), температуры газов (б), хода выгорания топлива (в) и коэффициента эффективности сгорания (г) в цикле по углу поворота коленчатого вала для показателей характера сгорания m

Наклон линии «видимого» сгорания (от точки начала сгорания до точки p_{max}) с увеличением m уменьшается, при этом снижается максимальное давление сгорания и увеличивается угол поворота коленчатого вала от в.м.т. до точки p_{max} (рисунок 2, а).

В таблице 3 приведены значения показателей рассматриваемых циклов.

Таблица 3 – Зависимость показателей рабочего цикла дизеля от показателя характера сгорания

Показатели рабочего цикла	Показатель характера сгорания m						Экспериментальные данные
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
Среднее индикаторное давление, МПа	1,461	1,424	1,443	1,460	1,468	1,474	1,430
Индикаторный КПД	0,469	0,457	0,463	0,469	0,471	0,473	0,468
Удельный индикаторный расход топлива, кг/(кВт·ч)	0,178	0,183	0,180	0,178	0,177	0,177	0,181
Максимальное давление сгорания, МПа	12,74	11,33	11,09	11,11	11,11	11,06	11,5
Угол поворота коленчатого вала α_p от в.м.т. до точки p_{max}, град.	7	8	9	10	11	12	–
Максимальная температура сгорания, К	1888	1782	1811	1861	1900	1929	–
Угол поворота коленчатого вала α_T от в.м.т. до точки T_{max}, град.	18	24	26	26	26	25	–
$\alpha_T - \alpha_p$, град.	11	16	16	16	15	14	–
Температура конца сгорания, К	1230	1254	1362	1484	1584	1663	–
Давление конца сгорания, МПа	0,97	0,99	1,42	2,09	2,82	3,50	–
Коэффициент эффективности сгорания	0,527	0,610	0,669	0,712	0,745	0,772	0,70–0,85
Продолжительность сгорания	120	120	96	78	67	60	–

Из данных таблицы 3 видно, что с увеличением m показатели p_i, η_i и b_i изменяются незначительно. Следовательно, изменение характера сгорания, при прочих равных условиях, практически не влияет на величины значений среднего индикаторного давления и удельного индикаторного расхода топлива (индикаторного КПД). Незначительное влияние оказывает m и на максимальные давление и температуру газа. Основное влияние m оказывает на продолжительность сгорания и, как следствие, на значения давления и температуры в конце процесса сгорания.

Значение коэффициента эффективности сгорания, близкое к экспериментальным данным, получается, когда показатель характера сгорания становится больше 0,4. При этом продолжительность сгорания входит в интервал 50 – 90 °, определенный ранее как наиболее вероятный. Возвращаясь к данным таблицы 1, можно отметить, что именно для этого интервала показатель характера сгорания имеет значения более 0,4. Таким образом, можно выделить вероятный интервал изменения показателя характера сгорания топлива от 0,4 до 1,0.

Список литературы

1. Вибе, И. И. Новое о рабочем процессе двигателя [Текст] / И. И. Вибе. Свердловск: Машгиз, 1962. – 272 с.

2. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания: Учебник [Текст] / А. Э. Симсон, А. З. Хомич и др. М.: Транспорт, 1987. – 536 с.

3. Володин, А. И. Локомотивные двигатели внутреннего сгорания [Текст] / А. И. Володин. М.: Транспорт, 1978. – 239 с.

УДК 629.423

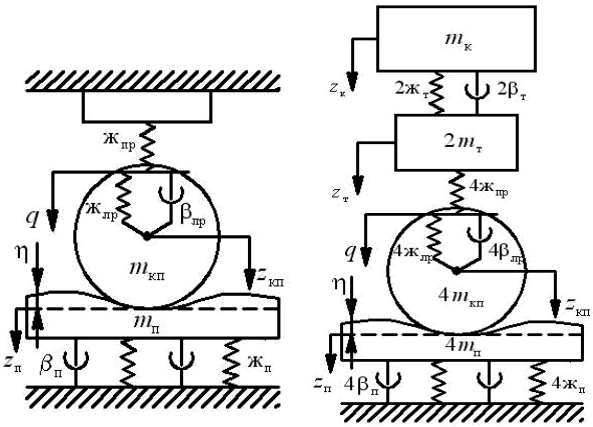
А. Н. Смалев

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЭКИПАЖА

В статье приведены некоторые математические модели вертикальной динамики экипажа различной степени сложности и проведено сравнение результатов расчетов по каждой из них. Сделан вывод о необходимости уточнения модели только в той мере, которая требуется для анализа динамических характеристик конкретного элемента экипажа.

Уточнение математических моделей и детализация процессов, протекающих в системе, являются достаточно трудоемкими задачами, требующими значительных затрат как на постановку задач и их формализацию, так и на вычислительные процессы, связанные непосредственно с их решением. Причем в этом случае должны получаться более точные, достоверные, адекватные результаты, поскольку учитываются также и второстепенные факторы, которые способны влиять на них. Хотя это влияние зачастую и незначительно, важно определить, насколько существенно изменятся результаты вычислений, и оценить соотношение между дополнительными затратами и повышением точности моделирования. При этом нельзя не отметить тот факт, что дополнительным препятствием для достижения целей усложнения модели может стать возрастание погрешности расчетов с помощью численных алгоритмов на вычислительных машинах.

Рассмотрим различия полученных результатов на примере трех математических моделей вертикальной динамики экипажа. Расположим их в порядке уточнения описания колебательных процессов: модель динамики необрессоренных масс, приведенных к колесной паре, линейчатая одноосная модель вертикальных колебаний экипажа и плоская модель динамики экипажа в продольной плоскости. Расчетные схемы указанных моделей приведены на рисунке 1. Первая из них, являющаяся наиболее простой, включает в



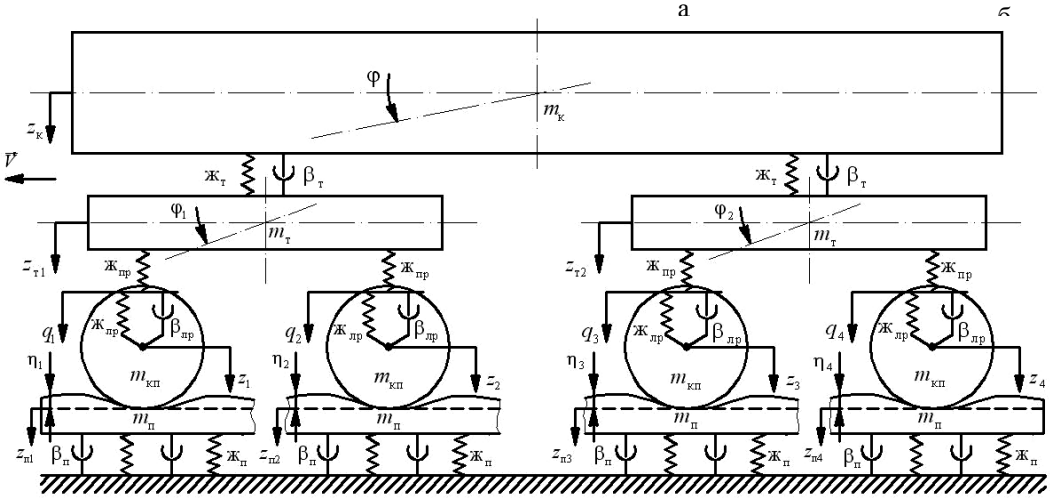


Рисунок 1 – Расчетная схема: а – модель динамики необрессоренных масс; б – линейчатая одноосная модель; в – плоская модель динамики экипажа

себя всего две степени свободы механической системы «колесо – путь» и позволяет оценить характеристики вертикальных колебаний колесной пары и листовой рессоры, а также, например, давления колесной пары на рельс. Вторая степень свободы появляется за счет того, что листовая рессора (или какая-то ее часть, равно как и закрепленные на ней буксовые пружины, также обладающие некоторой массой) способна совершать колебания независимо от колесной пары или рамы тележки. В частности, в этой модели рассматриваются только элементы необрессоренной части экипажа, остальные на основании известного принципа разделения движения обозначены неподвижными [1]. Вычисления проводятся относительно одной произвольно выбранной колесной пары экипажа, поэтому параметры пути и экипажа приведены в расчете на одну колесную пару.

Линейчатая одноосная модель напоминает модель динамики необрессоренных масс с тем различием, что вводятся еще две степени свободы. Следовательно, она позволяет определить характеристики вертикальных колебаний дополнительно для тележки и кузова локомотива. Особенность такой модели заключается в том, что все параметры экипажной части, а также пути приведены к одной оси колесной пары, это отражено в расчетной схеме (рисунок 1, б), где перед параметрами стоит коэффициент 2 или 4 в зависимости от числа элементов в секции локомотива или соответствующих параметров пути. Фактически это является частным случаем плоской модели, если учитывать воздействие пути как сосредоточенное или, другими словами, оказывающее одинаковое влияние на все колесные пары в определенный момент времени. В общем же случае плоская модель динамики экипажа (рисунок 1, в) учитывает временную задержку воздействия одной и той же точки пути на разные колесные пары, определяемую расстоянием между колесными парами и скоростью движения экипажа. Здесь все параметры задаются как распределенные, поэтому перед ними отсутствуют какие-либо коэффициенты. Приведенная плоская модель с четырнадцатью степенями свободы позволяет помимо линейных вертикальных перемещений и возникающих в системе усилий отдельно для каждого элемента экипажной части оценить также и угловые перемещения тележек и кузова.

В любой из принятых расчетных схем движение экипажа происходит по упругому пути с некоторой массой и диссипативными свойствами. Кроме этого продольный профиль рельса принимается неидеальным, его поверхность катания характеризуется некоторой геометрической неровностью, описываемой случайной функцией. Ее свойства зададим в виде спектральной плотности ускорения, независимой от частоты и являющейся функцией скорости экипажа [2]:

$$S_{\ddot{\eta}}(\omega) = 1,24 \cdot 10^{-6} V^3 = S_0(V). \qquad (1)$$

Теперь обозначим все обобщенные координаты, используемые в каждой из математических моделей системы: $z_к$ – вертикальное перемещение кузова; $z_т$ – вертикальное перемещение тележки; q – вертикальное перемещение листовой рессоры; $z_{к.п}$ – вертикальное перемещение колесной пары; $z_п$ – вертикальное перемещение пути; η – случайная функция геометрической неровности рельса. Приведенные координаты характерны для первых двух расчетных схем, кроме перемещений тележки и кузова, которые отсутствуют в модели динамики необрессоренных масс. В плоской модели наблюдаются существенные различия: помимо уже введенной координаты перемещения кузова $z_к$ обозначены также для каждого элемента экипажа следующие: φ – угловое перемещение кузова; φ_k и $z_{тk}$ – соответственно угловое и вертикальное перемещение k-й по ходу движения экипажа тележки; z_i и q_i – вертикальные перемещения i-й по ходу движения экипажа колесной пары и расположенных на ней листовых рессор соответственно; η_i – случайная функция геометрической неровности рельса, воздействующей на i-ю колесную пару; $k = 1, 2$; $i = 1 – 4$.

Помимо переменных величин, характеризующих различного рода перемещения в системе, зададим параметры экипажной части (на примере электровоза ВЛ10 [3], конструкция которого предусматривает наличие листовых рессор для гашения колебаний в буксовой ступе-

ни рессорного подвешивания) и пути: $m_к$ = 4,83 – масса кузова, тс·с^2/м; $m_т$ = 1,03 – масса обрессоренных частей тележки, тс·с^2/м; $m_{лр}$ = 0,012 – некоторая средняя масса буксового рессорного комплекта, соответствующая обобщенной координате q, тс·с^2/м; $m_{кп}$ = 0,662 – масса необрессоренных частей экипажа, тс·с^2/м; $m_п$ = 0,05 – «приведенная» масса пути, тс·с^2/м; $ж_т$ = = 200,4 – жесткость центральной ступени подвешивания, тс/м; $ж_{пр}$ = 1120 – жесткость пружин буксового рессорного комплекта, тс/м; $ж_{лр}$ = 244 – жесткость листовых рессор, тс/м; $ж_{п=}$ = 70000 – приведенная жесткость пути, тс/м; $\beta_т$ = 36,63 – коэффициент вязкого трения в центральной ступени подвешивания, взятый равным 0,2 доли от критического [4], тс·с/м; $\beta_{лр}$ = = 87,7 – эквивалентный коэффициент вязкого трения в листовой рессоре, тс·с/м, рассчитанный по методике М. И. Батя [5]; $\beta_п$ = 23 – приведенный коэффициент вязкого трения в пути, тс·с/м. Моменты инерции при вращении относительно центра масс: кузова – $J_к$ = 90 тс·м·с^2, тележки – $J_т$ = 1,62 тс·м·с2. Геометрические параметры экипажа: $2l$ = 7 – база кузова, м; $2b$ = = 3 – база тележки, м.

Составим уравнения вертикальной динамики экипажа при движении по упругому пути с геометрической неровностью рельса по каждой расчетной схеме. При этом в каждом случае исключим лишние координаты, соответствующие перемещению пути, на основании гипотезы о безотрывном движении колеса по рельсу (для плоской модели – все переменные с индексом i):

$$z_п = z_{кп} - \eta. \tag{2}$$

Геометрическая неровность представляет собой кинематическое возмущение и будет находиться в правой части дифференциального уравнения для соответствующей колесной пары, следовательно, она также не является обобщенной координатой. Кроме того, не будет проводиться оценка статистических характеристик угловых перемещений кузова и тележек, хотя в решении плоской модели эти обобщенные координаты, безусловно, присутствуют.

Составим необходимые уравнения с применением уравнения Лагранжа второго рода. Для модели движения по пути необрессоренных масс задача решена, например, в работе [5], и получены следующие результаты:

$$\begin{cases} m_{лр}\ddot{q} + \beta_{лр}\dot{q} + \left(ж_{пр} + ж_{лр}\right)q - \beta_{лр}\dot{z}_{кп} - ж_{лр}z_{кп} = 0; \\ \left(m_{кп} + m_п\right)\ddot{z}_{кп} + \left(\beta_{лр} + \beta_п\right)\dot{z}_{кп} + \left(ж_{лр} + ж_п\right)z_{кп} - \beta_{лр}\dot{q} - ж_{лр}q = m_п\ddot{\eta} + \beta_п\dot{\eta} + ж_п\eta. \end{cases} \tag{3}$$

Аналогично составим системы дифференциальных уравнений и по остальным расчетным схемам. Для линейчатой модели с четырьмя степенями свободы система уравнений динамики будет иметь вид:

$$\begin{cases} m_к\ddot{z}_к + \beta_т\dot{z}_к + ж_т z_к - \beta_т\dot{z}_т - ж_т z_т = 0; \\ m_т\ddot{z}_т + \beta_т\dot{z}_т + (ж_т + ж_{пр})z_т - \beta_т\dot{z}_к - ж_т z_к - ж_{пр}q = 0; \\ m_{лр}\ddot{q} + \beta_{лр}\dot{q} + (ж_{пр} + ж_{лр})q - \beta_{лр}\dot{z}_{кп} - ж_{лр}z_{кп} - ж_{пр}z_т = 0; \\ \left(m_{кп} + m_п\right)\ddot{z}_{кп} + \left(\beta_{лр} + \beta_п\right)\dot{z}_{кп} + \left(ж_{лр} + ж_п\right)z_{кп} - \beta_{лр}\dot{q} - ж_{лр}q = m_п\ddot{\eta} + \beta_п\dot{\eta} + ж_п\eta. \end{cases} \tag{4}$$

Для рассматриваемой плоской модели динамики экипажа с четырнадцатью степенями свободы получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} m_{\text{к}}\ddot{z}_{\text{к}} + 2\beta_{\text{т}}\dot{z}_{\text{к}} + 2\text{ж}_{\text{т}}z_{\text{к}} - \beta_{\text{т}}\dot{z}_{\text{т}1} - \text{ж}_{\text{т}}z_{\text{т}1} - \beta_{\text{т}}\dot{z}_{\text{т}2} - \text{ж}_{\text{т}}z_{\text{т}2} = 0; \\ J_{\text{к}}\ddot{\varphi} + 2l^2\beta_{\text{т}}\dot{\varphi} + 2l^2\text{ж}_{\text{т}}\varphi + l\beta_{\text{т}}\dot{z}_{\text{т}1} + l\,\text{ж}_{\text{т}}z_{\text{т}1} - l\beta_{\text{т}}\dot{z}_{\text{т}2} - l\,\text{ж}_{\text{т}}z_{\text{т}2} = 0; \\ m_{\text{т}}\ddot{z}_{\text{т}k} + \beta_{\text{т}}\dot{z}_{\text{т}k} + (\text{ж}_{\text{т}} + 2\text{ж}_{\text{пр}})z_{\text{т}k} - \beta_{\text{т}}\dot{z}_{\text{к}} - \text{ж}_{\text{т}}z_{\text{к}} + (-1)^{k+1}l\beta_{\text{т}}\dot{\varphi} + (-1)^{k+1}l\,\text{ж}_{\text{т}}\varphi - \text{ж}_{\text{пр}}q_{2k\text{-}1} - \text{ж}_{\text{пр}}q_{2k} = 0; \\ J_{\text{т}}\ddot{\varphi}_k + 2b^2\text{ж}_{\text{пр}}\varphi_k + b\,\text{ж}_{\text{пр}}q_{2k\text{-}1} - b\,\text{ж}_{\text{пр}}q_{2k} = 0; \\ m_{\text{лр}}\ddot{q}_i + \beta_{\text{лр}}\dot{q}_i + (\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}})q_i - \beta_{\text{лр}}\dot{z}_i - \text{ж}_{\text{лр}}z_i - \text{ж}_{\text{пр}}z_{\text{т}k} + (-1)^{i+1}b\,\text{ж}_{\text{пр}}\varphi_k = 0; \\ \left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\ddot{z}_i + \left(\beta_{\text{лр}} + \beta_{\text{п}}\right)\dot{z}_i + \left(\text{ж}_{\text{лр}} + \text{ж}_{\text{п}}\right)z_i - \beta_{\text{лр}}\dot{q}_i - \text{ж}_{\text{лр}}q_i = m_{\text{п}}\ddot{\eta}_i + \beta_{\text{п}}\dot{\eta}_i + \text{ж}_{\text{п}}\eta_i. \end{cases} \quad (5)$$

В системе (5) два первых уравнения относятся соответственно к линейным и угловым перемещениям кузова. Следующие две строки для линейных и угловых перемещений включают в себя по два уравнения каждая для первой и второй тележки по ходу движения экипажа, обозначенных индексом k. Пятая строка, описывающая колебания листовых рессор, содержит четыре уравнения для каждой из обобщенных координат q_i, при этом индекс k, соответствующий определенной координате тележки, можно определить с помощью выражения $k = (2i + 1 - (-1)^i)/4$. Последняя строка системы уравнений (5) соответствует колебаниям четырех колесных пар, в них входит возмущающее воздействие со стороны пути. В этом случае при движении экипажа с некоторой скоростью будет наблюдаться запаздывание воздействия на каждую следующую по ходу колесную пару, т. е.

$$\eta_i(t) = \eta(t - \tau_i), \quad (6)$$

время запаздывания для каждой колесной пары вычисляется по формулам: $\tau_1 = 0$; $\tau_2 = 2b/\upsilon$; $\tau_3 = 2l/\upsilon$; $\tau_3 = 2(b + l)/\upsilon$, где υ – скорость движения экипажа.

Поскольку в механической системе «экипаж – путь», представленной любой из моделей независимо от степени уточнения, возникают малые колебания с нулевым математическим ожиданием, то оценить колебательные процессы можно с помощью метода Винера – Хинчина [6]. В этом случае в качестве статистической характеристики случайных колебаний примем среднеквадратическое отклонение вертикального ускорения элемента системы, которое вычислим по формуле:

$$\sigma_{\ddot{x}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\ddot{x}}(\omega)d\omega. \quad (7)$$

Спектральная плотность произвольной обобщенной координаты системы $S_{\ddot{x}}(\omega)$ связана с аналогичной характеристикой случайного воздействия пути формулой:

$$S_{\ddot{x}}(\omega) = \left|W_x(j\omega)\right|^2 S_{\ddot{\eta}}(\omega), \quad (8)$$

где $\left|W_x(j\omega)\right|^2$ – квадрат модуля частотной передаточной функции системы (амплитудной частотной характеристики), определяющей свойства системы для выбранной обобщенной координаты x; $S_{\ddot{\eta}}(\omega)$ – спектральная плотность возмущающего воздействия геометрической неровности пути, заданная формулой (1).

Квадрат модуля передаточной функции соответствующей обобщенной координаты по неровности рельса найдем из системы дифференциальных уравнений. Для этого преобразуем все уравнения выбранной в зависимости от рассматриваемой модели системы по Лапласу при нулевых начальных условиях, а затем выразим наиболее удобным способом необходимое отношение изображений обобщенной координаты и неровности рельса, получив тем самым передаточную функцию в виде отношения двух полиномов комплексного переменного $A(s)$ и $B(s)$:

$$W_x(s) = \frac{X(s)}{\text{Н}(s)} = \frac{B(s)}{A(s)}, \tag{9}$$

где $X(s)$ и $\text{Н}(s)$ – изображения по Лапласу некоторой обобщенной координаты и случайных геометрических неровностей рельса соответственно.

Далее, подставляя $s = j\omega$ в выражение (9), перейдем к комплексной функции амплитудно-фазовой частотной характеристики системы, квадрат модуля которой и необходимо было отыскать. Для вычисления несобственного интеграла в формуле (7) можно воспользоваться методом, сводящимся к решению системы линейных алгебраических уравнений [7].

Следует наглядно продемонстрировать, каким образом усложняются вычисления при уточнении модели. Во-первых, отметим, что порядок передаточной функции напрямую связан с количеством степеней свободы системы и на каждую из них приходится полином второй степени в виде сомножителя в знаменателе. Таким образом, если для модели динамики необресоренных масс максимальный порядок передаточной функции равен четырем, то для плоской модели – уже двадцати восьми. Соответственно для самой простой из моделей приведем все коэффициенты полинома знаменателя, располагая их от старшей (четвертой) степени к младшей (нулевой):

$$\begin{cases} a_0 = m_{\text{лр}}\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right); \\ a_1 = \left(m_{\text{лр}} + m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\beta_{\text{лр}} + m_{\text{лр}}\beta_{\text{п}}; \\ a_2 = \beta_{\text{п}}\beta_{\text{лр}} + m_{\text{лр}}(\text{ж}_{\text{лр}} + \text{ж}_{\text{п}}) + \left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right); \\ a_3 = \beta_{\text{лр}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{п}}\right) + \beta_{\text{п}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right); \\ a_4 = \text{ж}_{\text{лр}}\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{п}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right). \end{cases} \tag{10}$$

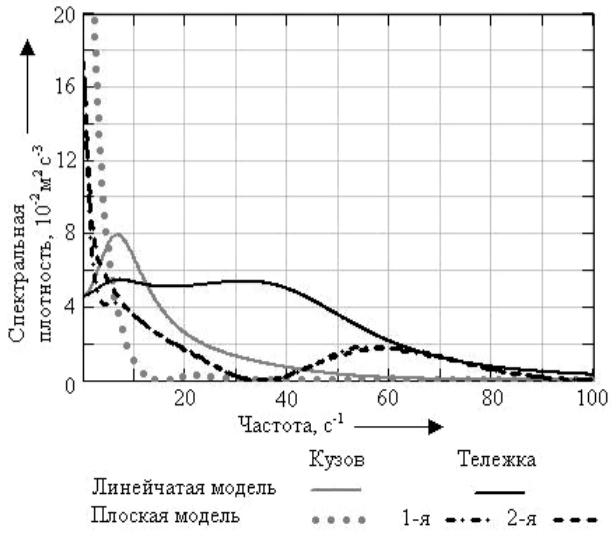
Для линейчатой одноосной модели приведем только три коэффициента (при наибольших степенях – от восьмой до шестой):

$$\begin{cases} a_0 = m_{\text{к}}m_{\text{т}}m_{\text{лр}}\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right); \\ a_1 = \left[\left(\left(\beta_{\text{лр}} + \beta_{\text{п}}\right)m_{\text{т}} + \beta_{\text{т}}\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\right)m_{\text{к}} + \beta_{\text{т}}m_{\text{т}}\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\right]m_{\text{лр}} + m_{\text{к}}m_{\text{т}}\beta_{\text{лр}}\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right); \\ a_2 = \left[\left((\text{ж}_{\text{лр}} + \text{ж}_{\text{п}})m_{\text{лр}} + \beta_{\text{лр}}\beta_{\text{п}} + (\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}})\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\right)m_{\text{т}} + \left(\left(\beta_{\text{лр}} + \beta_{\text{п}}\right)\beta_{\text{т}} + (\text{ж}_{\text{т}} + \text{ж}_{\text{пр}})\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\right)m_{\text{лр}} + \right. \\ \qquad \left. + \beta_{\text{т}}\beta_{\text{лр}}\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\right]m_{\text{к}} + \left[\left(\left(\beta_{\text{лр}} + \beta_{\text{п}}\right)\beta_{\text{т}} + \text{ж}_{\text{т}}\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\right)m_{\text{лр}} + \beta_{\text{т}}\beta_{\text{лр}}\left(m_{\text{кп}} + m_{\text{п}}\right)\right]m_{\text{т}}. \end{cases} \tag{11}$$

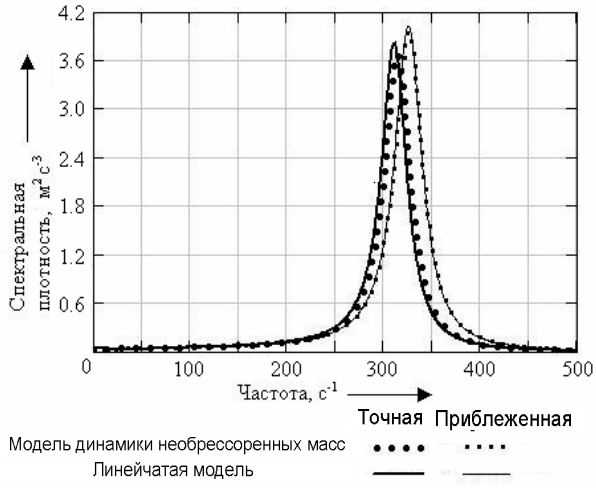
Очевидно, что формулы стали более громоздкими, при этом наибольшее число слагаемых будет, вообще говоря, в середине полинома в коэффициенте при четвертой степени. Что касается плоской модели, самой сложной из рассмотренных, то в этом случае приводить коэффициенты совершенно нецелесообразно. Достаточно только указать, что при старшей степени коэффициент состоит из четырнадцати сомножителей, каждый из которых является инерционным параметром (массой или моментом инерции) при второй производной координат во всех уравнениях, так же как и при младшей, где в качестве сомножителей используются параметры жесткости связей при нулевом порядке производной (самой координате). Остальные коэффициенты включают в себя весьма значительное количество слагаемых.

Итак, для вычисления среднеквадратического отклонения величины необходимо согласно выражению (7) рассчитать ее спектральную плотность. Таким образом, вычислим спектральные плотности для всех обобщенных координат по формуле (8). Поскольку спектральная плотность геометрической неровности зависит, учитывая (1), от скорости движения экипажа, то и для любой обобщенной координаты сохраняется эта зависимость, поэтому для каждого случая зададим скорость 120 км/ч. Отметим также, что в плоской модели АЧХ,

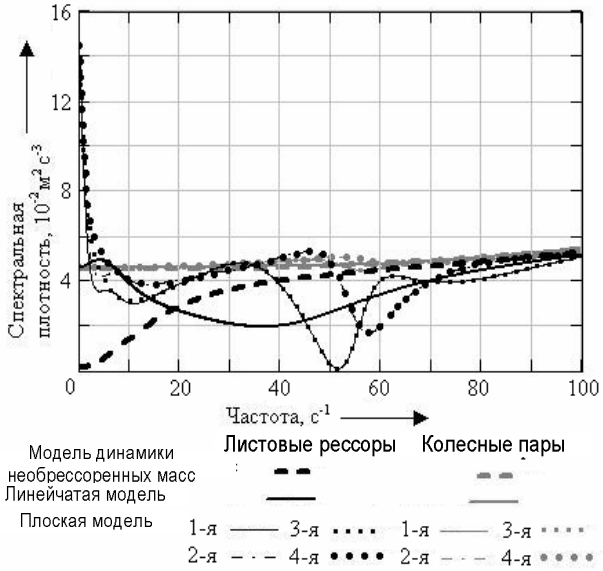
квадрат модуля которой присутствует в выражении (8), вследствие учета в (6) запаздывания воздействия пути на каждую колесную пару тоже зависит от скорости движения экипажа.



а



б



в

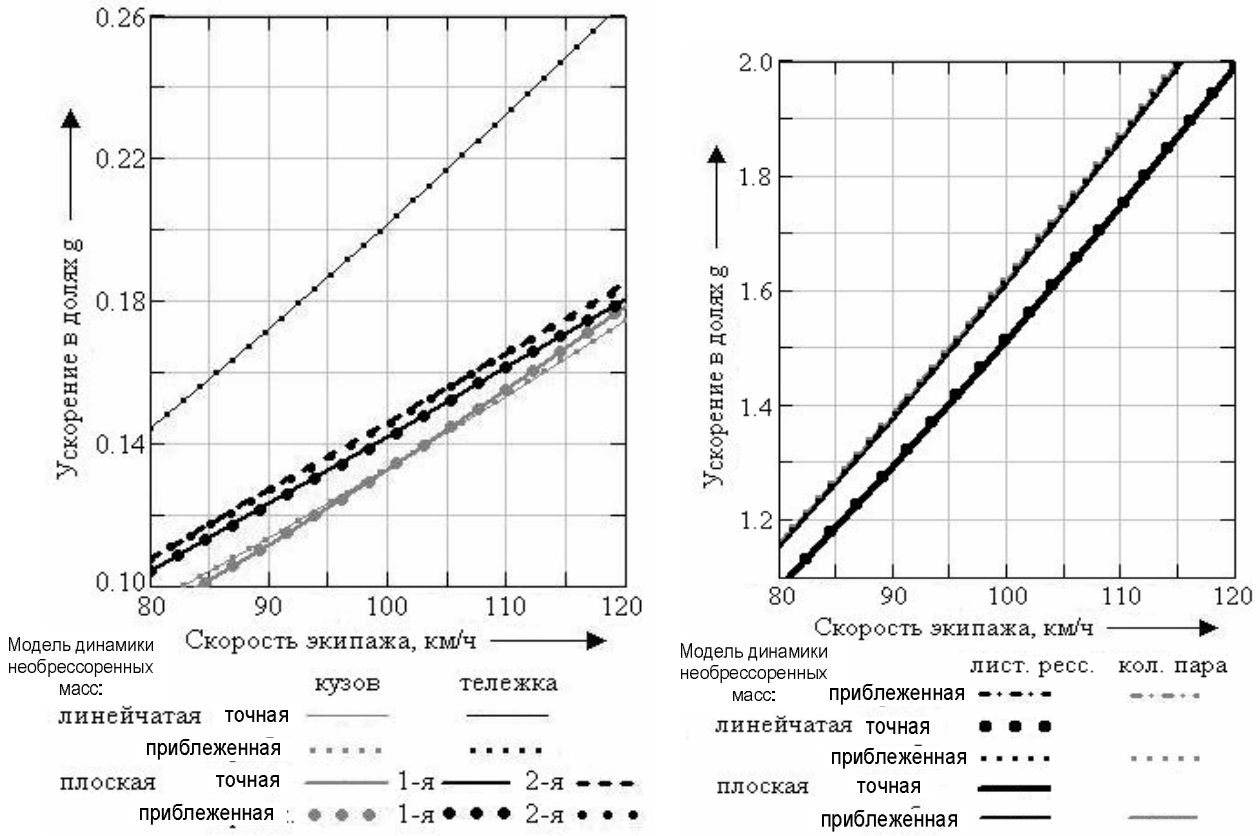
Рисунок 2 – Спектральные плотности ускорений вертикальных колебаний элементов экипажа: а – кузова и тележек; б – листовых рессор в области резонанса; в – листовых рессор и колесных пар при малых значениях частоты внешнего воздействия

Все расчеты, касающиеся данной характеристики, представлены на рисунке 2 в виде зависимости от частоты. Спектральные плотности ускорений кузова и тележек рассчитаны с использованием плоской и линейчатой одноосной моделей (рисунок 2, а). Для листовых рессор и колесных пар графики отражены отдельно для высокочастотного и низкочастотного диапазонов, поскольку в каждом из них свойства существенно отличаются. Для высокочастотного диапазона (рисунок 2, б) приведена только спектральная плотность ускорения листовых рессор, так как она почти совпадает с данной зависимостью для колесных пар. Кроме того, помимо расчетов по модели динамики необрессоренных масс приведены аналогичные результаты, полученные только по линейчатой модели (они близки к результатам, вычисленным по плоской модели). Главная особенность на высоких частотах заключается в расхождении точной (с учетом малых масс листовых рессор и пути) и приближенной характеристик для всех моделей динамики экипажа.

В низкочастотной области (рисунок 2, в), наоборот, характеристики не зависят от учета малых масс или от пренебрежения ими. Напротив, все различия, которые для колесных пар выражены, очевидно, в меньшей степени, связаны в основном с выбором математической модели. Следует отметить, что для плоской модели зависимость полученных спектральных плотностей от частоты для всех обобщенных координат на малых частотах носит ярко выраженный колебательный характер, что связано с влиянием запаздывания внешнего воздействия со стороны пути. Стоит отметить, что все указанные различия для каждой из рассмотренных моделей, как будет показано далее, почти не влияют на конечный результат.

Теперь вычислим среднеквадратические отклонения ускорений вертикальных колебаний для каждой координаты по формуле (7). Сразу оговорим, что точным будет условно считаться расчет по плоской модели, и уже от него будут считаться погрешности для других расчетных схем. Тем не менее требуется дополнительно указать на тот факт, что нет гарантии абсолютной точности таких расчетов, поскольку в силу значительной сложности модели, принимаемой за базовую, возможно появление в связи с большим объемом вычислений систематических ошибок при использовании стандартных алгоритмов, заложенных в наиболее распространенных пакетах математического моделирования, таких как MathCAD или Maple.

Заметим, что ни одна из рассмотренных нами моделей не позволяет вычислить СКО для ускорения колесной пары при условии учета малых масс листовой рессоры и пути, это же утверждение относится для расчета характеристик колебаний листовой рессоры по модели динамики необрессоренных масс экипажа. Однако нет никаких препятствий с тем же успехом провести эти расчеты по приближенным моделям, когда указанными массами пренебрегают, и в этом случае сравнить соответствующие приближенные результаты между собой.



а б

Рисунок 3 – Среднеквадратические отклонения ускорений вертикальных колебаний элементов экипажа: а – кузова и тележек; б – листовых рессор и колесных пар

Результаты вычислений по разным моделям для скоростей движения экипажа 80, 100 и 120 км/ч приведены на рисунке 3, кроме того, они сведены в таблицу, где дополнительно указана погрешность относительно расчетов с использованием плоской модели, принятой в качестве базовой. Для всех координат, где возможно, показаны результаты в случае учета («точн.») или без учета («прибл.») малых масс листовых рессор и пути. Кроме того, полученные значения можно сравнить с экспериментальными данными, приведенными в работе [5].

Среднеквадратическое отклонение вертикального ускорения элементов экипажа

Скорость экипажа, км/ч	Модель	Кузов				Тележка				Листовая рессора				Колесная пара			
		точн.	%	прибл.	%	точн.	%	прибл.	%	точн.	%	прибл.	%	точн.	%	прибл.	%
80	н	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,153	0,1	–	–	1,157	0
	л	0,095	3,3	0,095	3,3	0,144	37	0,144	37	1,085	0,3	1,158	0,5	–	–	1,163	0,5
	п	0,092	0	0,092	0	0,105	0	0,105	0	1,082	0	1,152	0	–	–	1,157	0
100	н	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,612	0	–	–	1,617	0,1
	л	0,133	0,8	0,133	0,8	0,201	40	0,201	40	1,516	0,1	1,618	0,4	–	–	1,626	0,6
	п	0,132	0	0,132	0	0,144	0	0,144	0	1,515	0	1,612	0	–	–	1,616	0
120	н	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,119	0,2	–	–	2,126	0,1
	л	0,175	-1,7	0,175	-1,7	0,265	45	0,265	45	1,993	0,1	2,127	0,6	–	–	2,137	0,6
	п	0,178	0	0,178	0	0,183	0	0,183	0	1,991	0	2,115	0	–	–	2,125	0

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что погрешность вычислений по более простым моделям оказывается несущественной (за исключением большого отличия для среднеквадратического отклонения ускорения тележки), следовательно, для получения статистических характеристик необрессоренных элементов, а также давления колесной пары на рельс нужно пользоваться первой, наиболее простой моделью. Для определения среднеквадратического отклонения и других динамических показателей кузова и тележек достаточно воспользоваться линейчатой одноосной моделью, не учитывающей галопирования элементов экипажа. Только для определения характеристик угловых перемещений возникает необходимость составлять наиболее подробную плоскую модель динамики экипажа.

Список литературы

1. Галиев, И. И. Метод разделения движения в задачах транспортной механики [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. В. Марковиченко // Исследование динамики транспортных и строительных конструкций. Межвуз. сб. науч. тр. / МИИТ.– М., 1989. – Вып. 817. – С. 4 – 10.

2. Ушкалов, В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей [Текст] / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – Киев: Наукова думка, 1982. – 360 с.

3. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов [Текст] / Под ред. Ф. М. Дементберга и К. С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.

4. Механическая часть тягового подвижного состава [Текст] / Под ред. И. В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.

5. Нехаев, В. А. Динамика необрессоренных масс электровоза ВЛ10 [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев, А. Н. Смалев // Транспорт Урала. – 2010. – № 25. – С. 65 – 68.

6. Лившиц, Н. А. Вероятностный анализ систем автоматического управления: В 2 т. Т. 1. Вероятностные и статистические характеристики воздействий и процессов. Линейные стационарные и нестационарные системы [Текст] / Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев. – М.: Советское радио, 1963. – 896 с.

7. Нехаев, В. А. О вычислении несобственных интегралов от дробно-рациональной функции при моделировании динамики экипажа [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев, А. Н. Смалев // Вестник Ростовского гос. ун-т. путей сообщения. – 2010. – № 39. – С. 53 – 58.

УДК 662.61.502.36

В. Р. Ведрученко, Н. В. Жданов

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДЫМОВОЙ ТРУБЫ БЛОЧНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОТЕЛЬНОЙ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

В статье предлагается методика определения температуры внутренней поверхности стальной дымовой трубы блочной автоматизированной котельной. Алгоритм расчета реализован в разработанной программе для ПЭВМ, которая используется в практике проектирования.

Основным условием надежной работы наружных газоходов и дымовой трубы (ДТ) является обеспечение в наиболее холодный период эксплуатации теплового режима без образования конденсата или обледенения внутренних поверхностей в зависимости от конструкции. Для исключения образования конденсата температура внутренней стенки газоходов и газоотводящего ствола ДТ $t_{ст}$ должна быть выше точки росы водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, а для исключения обмерзания – выше 0 °С. Особенно важно выполнение этого условия в оголовке ДТ [1]. Исходя из этого условия бесконденсатной работы дымовой трубы имеют вид: $t_{ст}^{ог} > t_р$ и $t_{ст}^{ог} > 0$ (где $t_{ст}^{ог}$ – температура стенки в оголовке дымовой трубы, °С; $t_р$ – температура точки росы в дымовых газах после подсушки, °С).

Для проверки выполнения указанных условий необходимо определить температуру дымовых газов на выходе из ДТ $t_{д.г}^{ог}$ и температуру стенки ее оголовка $t_{ст}^{ог}$ для конкретных условий эксплуатации и конструкций дымовой трубы.

Уравнение теплового баланса ДТ имеет вид:

$$B_p V_{д.г} \overline{c}_{д.г} (T_{ух} - T_{д.г}^{ог}) = \pi k_l H (T_{д.г}^{ср} - T_н), \quad (1)$$

где $B_р$ – расход топлива, м^3/с;

$V_{д.г}$ – объем дымовых газов, м^3/м^3;

$\overline{c}_{д.г}$ – средняя объемная теплоемкость дымовых газов в интервале температур $T_{ух} - T_{д.г}^{ог}$, кДж/(м^3·К);

$T_{ух}$, $T_{д.г}^{ог}$ – температура продуктов сгорания на выходе из котла и ДТ, К;

H – высота газоотводящего ствола ДТ, м;

$T_{д.г}^{ср} = \left(T_{ух} + T_{д.г}^{(ог)}\right)/2$ – средняя температура газов в ДТ, К;

$T_н$ – температура наружного воздуха, К;

k_l – линейный коэффициент теплопередачи от дымовых газов к наружному воздуху через цилиндрическую стенку ДТ, Вт/(м·К).

В большинстве современных блочных автоматизированных котельных (БАК) в качестве дымовой трубы используется металлическая изолированная труба, которая представляет собой трехслойную цилиндрическую стенку: 1-й слой – металлическая стенка толщиной δ_1; 2-й слой – тепловая изоляция толщиной δ_2; 3-й слой – покровный толщиной δ_3. Чаще всего в качестве покровного слоя применяется сталь оцинкованная листовая.

Тогда линейный коэффициент теплопередачи определим, как для трехслойной цилиндрической стенки, по выражению:

$$k_l = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{3} \dfrac{1}{2\lambda_i} \ln\left(\dfrac{d_i + 2\delta_i}{d_i}\right) + \dfrac{1}{\alpha_2 (d_3 + 2\delta_3)}}, \quad (2)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности i-го слоя, Вт/(м·К);

d_i – внутренний диаметр i-го слоя, м;

δ_i – толщина i-го слоя, м;

α_1 – коэффициент теплоотдачи между дымовыми газами и внутренней поверхностью ДТ, Вт/(м^2·К);

α_2 – коэффициент теплоотдачи между наружным воздухом и наружной поверхностью покровного слоя ДТ, Вт/(м^2·К).

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала зависит от его температуры. Для случая течения газов в ДТ среднее значение теплопроводности теплоизоляционного материала можно определить по формуле [2]:

$$\lambda_{\text{из}} = a + 0,5bt_{\text{д.г}}^{\text{ср}}. \tag{3}$$

В качестве теплоизоляционного материала в конструкции ДТ часто применяются маты из стеклянного штапельного волокна на синтетическом связующем с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{из}} = 0,04 + 0,0003t_{\text{д.г}}/2$ [2].

Коэффициент теплоотдачи в общем виде выражается зависимостью:

$$\alpha = Nu\frac{\lambda}{d}, \tag{4}$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К);

d – характеристический диаметр, м;

Nu – критерий Нуссельта.

Критерий Нуссельта характеризует конвективный теплообмен и зависит от характера течения дымовых газов в ДТ (свободное, ламинарное, турбулентное), формы и расположения обтекаемой поверхности.

Для случая турбулентного течения газов в ДТ критериальное уравнение теплообмена между газами и поверхностью внутренней стенки ДТ, предложенное академиком М. А. Михеевым, имеет вид [3]:

$$Nu = 0,021Re_{\text{г},d}^{0,8}Pr_{\text{г}}^{0,43}\left(\frac{Pr_{\text{г}}}{Pr_{\text{с}}}\right)^{0,25}, \tag{5}$$

где $Pr_{\text{г}}$ и $Pr_{\text{с}}$ – критерий Прандтля при данной температуре газов и температуре стенки.

Для газов можно считать множитель $\left(Pr_{\text{г}}/Pr_c\right)^{0,25} \approx 1$.

$Re_{\text{г},d}$ – критерий Рейнольдса:

$$Re_{\text{г},d} = \frac{w_1 d_1}{\upsilon_{\text{г}}}, \tag{6}$$

где $\upsilon_{\text{г}}$ – коэффициент кинематической вязкости дымовых газов, м^2/с;

w_1 – скорость газов в ДТ, м/с,

$$w_1 = \frac{B_{\text{р}}V_{\text{дг}}T_{\text{дг}}^{(\text{ср})}}{273}\frac{4}{\pi d_1^2}. \tag{7}$$

В случае поперечного обтекания наружной поверхности ДТ потоком воздуха критериальное уравнение имеет вид [4]:

$$Nu = C\,Re^m, \tag{8}$$

где C, m – коэффициенты, зависящие от значения критерия Рейнольдса (выбираются по таблице).

Значения коэффициентов C и m в зависимости от Re

Коэффициент Рейнольдса Re	Коэффициент	
	C	m
$35 \div 5\cdot10^3$	0,583	0,471
$5\cdot10^3 \div 5\cdot10^4$	0,148	0,633
$5\cdot10^4 \div 5\cdot10^5$	0,0208	0,814

В выражении (8) за определяющий размер принимается наружный диаметр покровного слоя ДТ d_3, а за определяющую температуру – средняя температура пограничного слоя газов $t_m = (t_{ст} + t_{дг}^{(ср)}) / 2$. Скорость ветра принимается как максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь [5].

Из уравнения (1) выразим температуру дымовых газов на выходе из ДТ:

$$t_{д.г}^{ог} = \frac{2B_р V_{д.г}\overline{c}_{д.г} t_{ух} - \pi k_l H(t_{ух} - 2t_н)}{\pi k_l H + 2B_р V_{д.г}\overline{c}_{д.г}}. \quad (9)$$

Температура внутренней поверхности трубы $t_{ст}$ может быть определена из уравнения теплопередачи от газов к наружному воздуху и для оголовка ДТ примет вид:

$$t_{ст}^{ог} = t_{д.г}^{ог} - \frac{k_l(t_{д.г}^{ог} - t_н)}{\alpha_1 d_1}. \quad (10)$$

Алгоритм, основанный на изложенной выше методике, реализован в разработанной программе для ПЭВМ. В результате моделирования процессов теплообмена в ДТ с тепловой изоляцией и без нее для расчетных климатических условий г. Омска получен характер изменения температуры дымовых газов и стенки дымовой трубы в ее оголовке при различных режимах работы водогрейного котла КВСА-3 производства ООО ПФ «Октан» (рисунки 1, 2).

Из анализа рисунка 1 видна необходимость изоляции дымовой трубы, так как при ее отсутствии дымовые газы, прошедшие через газоотводящий тракт, охлаждаются ниже температуры точки росы $t_р$, при этом возможна конденсация водяных паров. В дымовой трубе без изоляции конденсация водяных паров происходит при тепловой нагрузке котла ниже 62 % от номинальной.

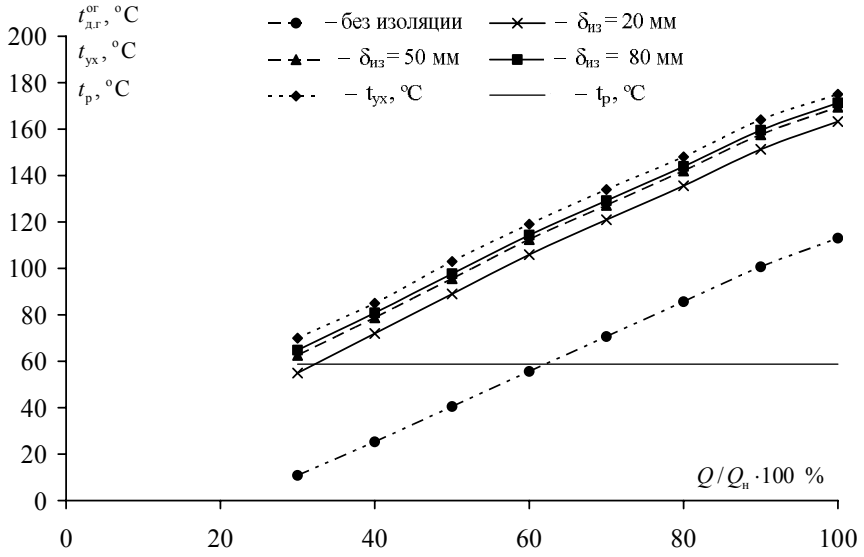


Рисунок 1 – Зависимость температуры дымовых газов на выходе из дымовой трубы $t_{д.г}^{ог}$ от режима работы котла КВСА-3

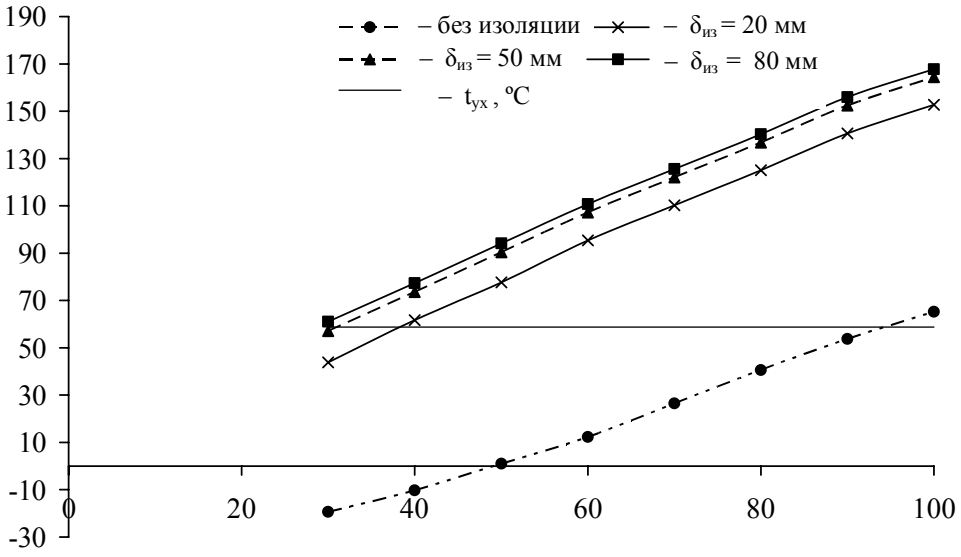


Рисунок 2 – Зависимость температуры стенки оголовка дымовой трубы $t_{ст}^{ог}$ от режима работы котла КВСА-3

На рисунке 2 показана температура стенки оголовка неизолированной дымовой трубы $t_{ст}^{ог}$, которая ниже $t_р$ практически во всех режимах работы котла. Более того, при тепловой нагрузке котла менее 50 % температура $t_{ст}^{ог}$ становится ниже 0 °С, что приводит к обледенению оголовка и, как следствие, – к возникновению аварийной ситуации. Изоляция газоотводящего тракта толщиной $\delta_{из}$ = 50 мм позволяет предотвратить конденсацию водяных паров в дымовой трубе во всех режимах работы котла и тем более исключить ее обледенение.

Таким образом, при работе котла на индивидуальную ДТ, не рассчитанную на конденсацию в ней водяных паров, необходима ее тепловая изоляция, исключающая возможное образования конденсата и обмерзание оголовка. Тепловая изоляция позволяет сохранить безаварийную работу дымовой трубы и продлить срок ее службы.

Изложенная методика и программа реализованы и используются в ООО ПФ «Октан» (г. Омск) при проектировании БАК.

Список литературы

1. Левушкина, Ю. В. Математическая модель теплообмена в дымовых трубах котельных агрегатов [Текст] / Ю. В. Левушкина // Теплоэнергетика и теплоснабжение: Сб. науч. тр. / Ульяновский Государственный Технический Университет. – Ульяновск, 2002. – Вып. 1. – С. 46 – 52.

2. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – Взамен СНиП 2.04.14–88; введ. 2003. – СПб: ДЕАН, 2004. – 64 с.

3. Михеев, М. А. Основы теплопередач [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

4. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров [Текст] / Х. Уонг; Пер. с англ. В. В. Яковлева, В. И. Колядина. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

5. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. – Взамен СНиП 2.01.01–82; введ. 1999–06–11: внесено изм. № 1; введ. 2003–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 46 с.

УДК 621.331: 621.311.004.18

О. А. Ибрагимова, В. М. Лебедев

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

В статье предлагаются основные направления совершенствования работы существующих источников тепла. Приведены расчеты по возможной совместной работе омской ТЭЦ-5 и котельной ООО «Теплогенерирующий комплекс» в качестве одного из способов оптимизации работы системы теплоснабжения района города.

Развитие энергетики нашей страны в 30-х гг. прошлого века проходило по пути строительства крупных электростанций (ТЭС и КЭС) для нужд потребителей (население, промышленность и др.). Такие теплоисточники получили название централизованных, а теплоснабжение от них стало называться централизованным теплоснабжением. Но за последние 10 – 15 лет ситуация кардинально изменилась. «Большая энергетика» практически перестала развиваться, а вместо экономичных ТЭЦ стали эксплуатироваться децентрализованные источники теплоснабжения, которые производят только один вид энергии – теплоту для отопления и горячую воду для ограниченного числа жителей. Это связано с падением производства во многих отраслях промышленности и резким снижением потребности промышленного сектора в теплоте и электричестве, а также с нестабильностью экономики.

Теплофикация же позволяет наиболее полно использовать топливо при производстве теплоты и электричества в одной установке (комбинированном цикле) с более высоким КПД, чем при раздельной схеме. Достижение максимального КПД возможно в случае модернизации и совершенствования работы уже существующих источников теплоснабжения.

В случае, когда в качестве основного топлива используется природный газ, целесообразно применять газотурбинные установки (ГТУ) с утилизацией теплоты уходящих газов в паровых или водогрейных котлах для целей теплоснабжения потребителей [1]. Следует отметить, что в Омске большое количество котельных в качестве основного топлива использует природный газ, а реализация проекта установки ГТУ на своих площадках позволит полностью обеспечить котельную электроэнергией, а наличие избытков этого вида энергии – продавать ее сторонним потребителям, получая дополнительную прибыль.

При такой схеме энергоснабжения одним из существенных вопросов, который требует своего решения, является вопрос шумоглушения при размещении ГТУ в черте города.

Нельзя не отметить возможность и целесообразность применения на паровых котельных и реконструируемых старых ТЭЦ противодавленческих турбин небольшой мощности (от 0,5 до 4,0 тыс. кВт), т. е. целесообразна реорганизация этих объектов в ТЭЦ малой мощности для выработки наряду с тепловой еще и электрической энергии для покрытия собственных нужд. Срок окупаемости таких проектов невелик и находится в пределах от двух до четырех лет.

В тех случаях, когда на ТЭЦ имеется резерв мощности и для организации оптимальной загрузки низкопотенциальных отборов теплофикационных турбин целесообразно применить совместную работу ТЭЦ и котельной, имеющей статус районной, при переводе последней в пиковый режим работы. Загрузка отборов позволяет увеличить выработку электрической энергии на тепловом потреблении, а следовательно, экономить топливо на ТЭЦ и снижать расчетные затраты.

Наиболее оптимальный вариант, если ТЭЦ находится за чертой города, что значительно уменьшает количество вредных выбросов от подобного мощного теплоисточника (возможность реализации дальнего теплоснабжения).

Заметим, что в большинстве случаев системы централизованного теплоснабжения обеспечивают максимальные параметры теплоносителя не 150 ºС, а 100 – 110 ºС, т. е. покрывают только базовую часть нагрузки. Снижение расчетной температуры теплоносителя ведет к увеличению количества перекачиваемого теплоносителя, а также количества электроэнергии

на транспорт тепла. Происходит это большей частью из-за изношенного (аварийного) состояния тепловых сетей (ТС). По оценкам разных источников [1 – 3] аварийность составляет от 70 до 90 повреждений на 100 км сетей в год.

Поэтому целесообразно идти по пути внедрения пиковых источников тепла, которые позволяют при низких значениях температуры наружного воздуха увеличивать температуру теплоносителя, поступающего из теплосети, до требуемых параметров. Пиковые источники повышают надежность системы теплоснабжения в целом и будут круглогодично снабжать потребителей горячей водой.

По оценкам ВНИПИэнергопрома оптимальная тепловая мощность этих котельных составляет в крупных системах от 300 до 500 Гкал/ч [1]. Очевидно, что мощность пиковых источников тепла должна соответствовать коэффициенту теплофикации для данной системы.

Коэффициент теплофикации такой системы можно определить по формуле [4]:

$$\alpha_c = \frac{Q_o}{Q_c}, \qquad (1)$$

где Q_o – тепловая мощность отборов теплофикационных турбин ТЭЦ, Гкал/ч;

Q_c – общая тепловая мощность системы, Гкал/ч, определяемая как

$$Q_c = Q_o + Q_{п.т.} + Q_{п.р.}, \qquad (2)$$

где $Q_{п.т.}$ – мощность пиковых котлов, установленных на ТЭЦ, Гкал/ч;

$Q_{п.р.}$ – мощность пиковых котлов, установленных в районных котельных, Гкал/ч.

Наличие подобных пиковых источников теплоснабжения при авариях на теплопроводах или станции позволяет обеспечить необходимый минимальный уровень теплопотребления жителей района, исключить возможность замораживания системы.

Величина коэффициента использования топлива такой сложной системы, включающей в себя ТЭЦ и районную котельную, может быть определена по уравнению теплового баланса по методу И. Н. Бутакова [5].

Анализ современного состояния теплоисточников в г. Омске позволил выявить наличие свободных мощностей паровых турбин на омской ТЭЦ-5, а при совместной ее работе с котельной ООО «Теплогенерирующий комплекс», находящейся в пос. Амурский, позволит снизить расход топлива на источнике, а также увеличить выработку электрической энергии на тепловом потреблении за счет дополнительной загрузки теплофикационных отборов.

Предлагается передача части тепловой нагрузки с котельной ООО «Теплогенерирующий комплекс» в размере 150 Гкал/ч на ТЭЦ-5, остальная часть – 32 Гкал/ч – остается на балансе котельной, которая переводится в пиковый режим работы.

Схема совместной работы ТЭЦ-5 и котельной ООО «Теплогенерирующий комплекс» представлена на рисунке 1.

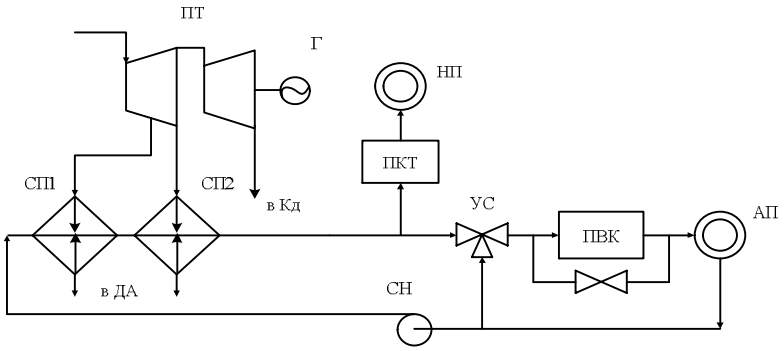


Рисунок 1 – Схема системы теплоснабжения при организации совместной работы ТЭЦ и районной котельной: ПТ – паровая турбина; Г – генератор; СП1, СП2 – сетевые подогреватели первой и второй ступени; НП – неавтономные потребители теплоты; ПКТ – пиковая котельная ТЭЦ; СН – сетевой насос; УС – узел смешения; ПВК – пиковая водогрейная котельная; АП – автономные потребители теплоты; Кд – конденсатор; ДА – деаэратор

Сетевая вода после сетевых подогревателей турбин разделяется на два потока: один поток следует в пиковые водогрейные котлы ТЭЦ-5 (если это требуется по температурному графику), а затем – к неавтономным потребителям тепла; второй поток направляется в район потребления тепла автономных абонентов.

На районной котельной ООО «Теплогенерирующий комплекс» (суммарная нагрузка составляет 182 Гкал/ч) имеется узел смешения потоков тепла из прямой линии теплосети от ТЭЦ-5 с нагрузкой 150 Гкал/ч и потока тепла из обратного трубопровода сетевой воды, циркулирующей в районе с нагрузкой 32 Гкал/ч. После смешения сетевая вода либо поступает напрямую к потребителю, минуя пиковые водогрейные котлы в котельной, либо проходит водогрейные котлы, повышая свою температуру до 130 ºС при температурном графике района 130/70.

Предлагается качественный режим работы ТЭЦ-5 и районной котельной ООО «Теплогенерирующий комплекс», т.к. отпуск тепла от ТЭЦ-5 осуществляется в открытой системе при качественном режиме. От котельной ООО «Теплогенерирующий комплекс» осуществляется качественный режим работы закрытой системы теплоснабжения района.

На ТЭЦ-5 от районной котельной передается нагрузка 150 Гкал/ч, которая обеспечивает практически всю отопительную нагрузку (163,701 Гкал/ч) района. Максимальная температура воды, отпускаемой от ТЭЦ-5 в район потребления тепла, составляет 112 ºС (после сетевых подогревателей турбин). Расход воды на отопление района от ТЭЦ определим, воспользовавшись графиком нагрузки района (рисунок 2) и температурными графиками отпуска тепла (рисунок 3).

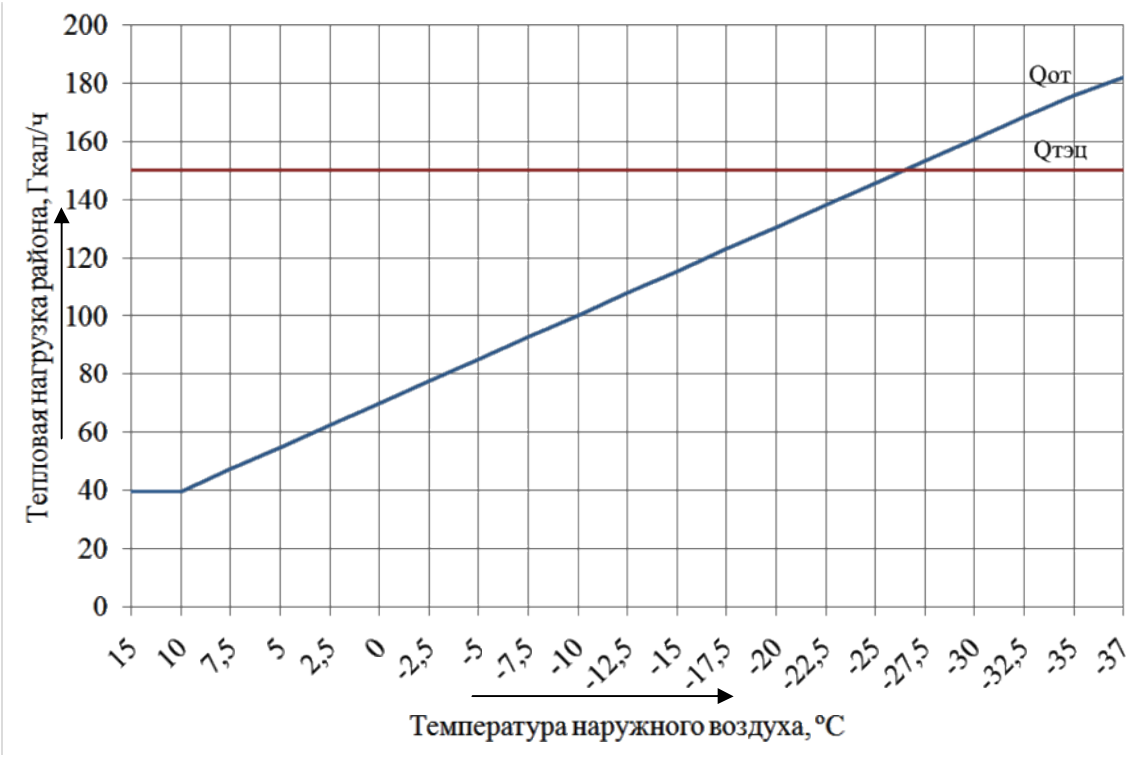


Рисунок 2 – Суммарный график тепловой нагрузки района

Из графика на рисунке 2 видно, что нагрузка $Q_{ТЭЦ}$ = 150 Гкал/ч обеспечивается до температуры наружного воздуха -26,5 ºС, что соответствует температуре воды в прямой линии теплосети от ТЭЦ 112 ºС и в обратной линии составляет 57,4 ºС (см. рисунок 3). При понижении температуры наружного воздуха ниже -26,5 ºС тепловая нагрузка района от ТЭЦ не может быть полностью покрыта.

На рисунке 3 представлены температурные графики отпуска тепла от ТЭЦ-5 – 150/70 и от районной котельной п. Амурский – 130/70.

По температурному графику (см. рисунок 3) видно, что при температуре наружного воздуха -20 ºС температура воды в магистральном трубопроводе от ТЭЦ составляет 112 ºС , а температуре воды в квартальном трубопроводе 112 ºС соответствует температура наружного воздуха -26,5 ºС.

Рисунок 3 – Температурные графики отпуска тепла от ТЭЦ-5 и районая котельная предприятия ООО «Теплогенерирующий комплекс»

Расход воды на отопление микрорайона можно определить по уравнению:

$$G_{от} = \frac{Q_{от}}{c(\tau_1 - \tau_2)\cdot 10^3}\ , \qquad (3)$$

где $G_{от}$ – расход теплоносителя на отопление, т/ч;

$Q_{от}$ – расход тепла на отопление, Гкал/ч;

c – удельная теплоемкость воды, ккал/(кг·ºС);

τ_1 и τ_2 – температура воды в прямой и в обратной магистрали, ºС.

Тогда расход воды от ТЭЦ, т/ч:

$$G_{ТЭЦ} = \frac{150\cdot 10^9}{1\cdot 10^3\cdot(112-57,4)} = 2747,3\cdot$$

При понижении температуры наружного воздуха ниже -26,5 ºС будет включаться в работу пиковая районная котельная. При температуре наружного воздуха ниже -26,5 ºС температура в магистральном трубопроводе теплосети от ТЭЦ будет постоянной и составит 112 ºС.

Расход теплоносителя, т/ч, в микрорайоне с тепловой нагрузкой 182 Гкал/ч:

$$G = \frac{182\cdot 10^9}{1\cdot 10^3\cdot(130-70)} = 3033,3\cdot$$

Расход теплоносителя, т/ч, от районной котельной ООО «Электротехнический комплекс» с нагрузкой 32 Гкал/ч

$$G_{РК} = G - G_{ТЭЦ}; \quad (4)$$

$$G_{РК} = 3033,3 - 2747,3 = 286.$$

В таблице 1 указаны значения нагрузки теплосети, покрываемой от ТЭЦ-5 и необходимой для микрорайона при различных значениях температуры наружного воздуха, а в таблице 2 указаны значения температуры воды в основных трубопроводах системы.

Таблица 1 – Значения тепловых нагрузок в зависимости от температуры наружного воздуха

Температура наружного воздуха, ºС	Нагрузка, покрываемая от ТЭЦ-5, Гкал/ч	Нагрузка, покрываемая от котельной пос. Амурский, Гкал/ч	Тепловая нагрузка в районе (по графику), Гкал/ч
-26,5	150	0	150
-30	150	10,73	160,73
-35	150	25,85	175,85
-37	150	32	182

На районной котельной пос. Амурский, установлено шесть водогрейных котлов типа ПТВМ-50 производительностью 50 Гкал/ч. Из значений, приведенных в таблице 1, можно сделать вывод о том, что суммарная максимальная нагрузка котлов составляет 32 Гкал/ч. Соответственно на котельной будут работать только один – два котла из шести установленных.

Таблица 2 – Значения температуры теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха

Температура наружного воздуха, ºС	Температура воды в транзитном трубопроводе от ТЭЦ $\tau_1^т$, ºС	Температура воды в обратном трубопроводе района $\tau_2^р$, ºС	Температура воды после смешения $t_{см}$, ºС	Необходимая температура воды в подающем трубопроводе района $\tau_1^р$, ºС
-20	112	57	106,81	99
-26,5	112	63	107,38	112
-30	112	64,7	107,54	117,3
-35	112	68,5	107,9	125,6
-37	112	70	108,04	130

Анализ полученных данных показывает, что температура воды в транзитном трубопроводе от ТЭЦ $\tau_1^т$ существенно выше, чем необходимая температура воды в прямом трубопроводе района $\tau_1^р$. Для осуществления комфорта потребителей необходим узел смешения (см. рисунок 1), установленный на котельной, который производит смешение двух потоков: воды из транзитной магистрали в количестве $G_{ТЭЦ}$ = 2747,3 т/ч и воды из обратного трубопровода теплосети в количестве $G_{РК}$ = 286 т/ч.

Таким образом, совместная работа ТЭЦ-5 и котельной ООО «Теплогенерирующий комплекс» позволяет снизить неблагоприятную экологическую нагрузку в пос. Амурский в связи с работой котельной только в пиковые часы. Переданная на баланс ТЭЦ-5 тепловая нагрузка позволит увеличить выработку электрической энергии на базе теплового потребления и увеличить загрузку низкопотенциальных отборов теплофикационных турбин. Рассчитанные значения температуры в подающих и обратных трубопроводах теплосети наглядно проиллюстрированы на рисунках 2, 3, что позволяет легко их анализировать.

Следует отметить, что организовать совместную работу ТЭЦ-5 и котельной пос. Амурский несколько проще (не требуется монтаж нового оборудования, а, наоборот, нужен демонтаж или даже консервация существующего), чем устанавливать паровые или газовые турбины на площадках существующих котельных города. Все три направления совершенствования работы существующих теплоисточников можно использовать не только на городских промышленно-отопительных котельных, но и на ведомственных котельных железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Основные проблемы и задачи развития централизованного теплоснабжения [Текст] // Новости теплоснабжения. – 2007. – №1. – С. 28 – 32.
2. Яновский, Ф. Б. Энергетическая стратегия развития теплоснабжения России [Текст] / Ф. Б. Яновский, С. А. Михайлова // Энергосбережение. – 2003. – № 6. – С. 26 – 34.
3. Некрасов, А. С. Состояние и перспективы развития теплоснабжения в России [Текст] / А. С. Некрасов, С. А. Воронина // Энергосбережение. – 2004. – № 3. – С. 22 – 26.
4. Жирнов, Н. И. Пиковые водогрейные котлы большой мощности [Текст] / Н. И. Жирнов, Л. Б. Кроль. – М.: Энергия, 1964. – 150 с.
5. Бутаков, И. Н. Коэффициент полезного действия тепловых установок и энергосистем [Текст] / И. Н. Бутаков / Томский гос. ун-т – Томск, – 1961. – 144 с.

УДК 621.331:621.311.004.18

А. Л. Каштанов, А. Н. Ларин, А. В. Пономарев

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСАВП В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ

Унифицированные системы автоматизированного ведения поезда дают ряд преимуществ по сравнению с управлением подвижного состава машинистом. С целью обоснования целесообразности внедрения данного комплекса возникает необходимость в разработке методики по оценке технико-экономического эффекта. Кроме того, анализ результатов, основанный на статистической обработке исходных данных, позволит определять условия, при которых достигается максимальный эффект при использовании систем УСАВП.

В настоящее время на железнодорожном транспорте ведется широкое внедрение унифицированных систем автоматизированного ведения (УСАВП) с регистратором параметров движения поезда (РПДА). Данные системы предназначены для автоматизированного управления режимами тяги и торможения локомотивов на основе расчета энергооптимальных алгоритмов при условии ограничения продольно-динамических сил в составе поезда, выполнении безопасных режимов управления поездом и условий безопасности движения поездов, а также облегчения труда локомотивных бригад.

Системы автоведения выполняют следующие функции [1, 2]:

– определяют фактические параметры движения поезда и выводят их на экран дисплея;

– ведут расчет рекомендуемых параметров движения поезда и управляющих воздействий в реальном времени;

– управляют тягой и торможением;

– осуществляют визуальный и звуковой диалог с машинистом;

– производят запись регистрируемых параметров на картридж (через подсистему РПДА);

– проводят тестирование аппаратуры автоведения и тягового подвижного состава и осуществляют контроль исправности аппаратуры.

Система автоведения обеспечивает поддержание заданной скорости и непрерывно рассчитывает ее оптимальное значение в условиях меняющейся поездной обстановки, минимизируя расход электроэнергии и жестко соблюдая перегонное время хода для грузового движения.

Внедрение систем УСАВП требует значительных капиталовложений. Таким образом, представленные преимущества следует тщательно соизмерять с инвестициями, связанными с реализацией данного проекта. В сложившихся условиях возникает необходимость в разработке методики по оценке технико-экономической эффективности использования систем УСАВП.

В целом эффективность систем УСАВП можно рассматривать по трем направлениям (рисунок 1):

снижение удельного расхода электрической энергии (УРЭ) на тягу поездов;

повышение безопасности движения;

снижение трудозатрат железной дороги (локомотивного депо).

Достоверно оценить эффективность за счет «повышения безопасности движения» не представляется возможным, поэтому расчет эффекта включает в себя два этапа.

Первым шагом расчета является оценка снижения эксплуатационных расходов за счет снижения удельного расхода энергоресурсов на тягу поездов. Удельный расход энергоресурсов на тягу поездов на уровне одной поездки с грузовым поездом является случайной величиной, что определяет необходимость вероятностного подхода к описанию его закономерностей. Основными факторами, определяющими величину УРЭ, является масса поезда Q и масса на ось вагона q, которые функционально связаны между собой.

Рисунок 1 – Направления по оценке эффективности использования РПДА УСАВП

Следует отметить, что при оценке УРЭ на тягу поездов в грузовом движении следует включать величину q, так как при изменении длины поезда (числа осей) и q = const величина УРЭ изменяется несущественно, в то же время изменение величины q при тех же условиях приводит к значительному изменению УРЭ. При расчете УРЭ наиболее целесообразным является определение необходимых корреляционных зависимостей по данным, сгруппированным по квантам массы, приходящейся на ось вагона. Наиболее рациональное количество квантов по массе на ось равно 10 с интервалом 2 т. Формирование величины УРЭ по участку происходит в результате совместного воздействия значений УРЭ по квантам и распределения работы по ним, которое характеризуется структурой грузопотока [3].

Системы автоведения могут работать в следующих режимах

1. Режим автоведения – система автоведения берет на себя полное управление поездом, используя органы управления локомотивом.

2. Режим советчика – управление производится машинистом.

3. Режим кнопочного контроллера – управление поездом осуществляется машинистом через клавиатуру системы автоведения.

Подход к определению энергоэффективности использования УСАВП за счет изменения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов, состоит в сравнении поездок, выполненных в различных режимах: использование режима автоведения менее 25 %; от 25 до 50 %; от 50 % до 75 % и более 75 %.

Первая группа отождествляется со случаями, когда автоведение не используется, последняя – когда используется. Третья и четвертые группы – промежуточные – и носят дополнительный информационный характер, помогая разобраться в зависимости расхода энергоресурсов от использования системы УСАВП на различных участках движения.

Удельный расход энергоресурсов на движение совокупности грузовых поездов на некотором участке за определенный период времени (в этом случае ряд факторов, а именно особенности участка и метеорологические условия, можно считать постоянно действующими) определяется выражением, кВт·ч/10^4 ткм:

$$\omega_k = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_{(k)i}}{\sum_{i=1}^{n} A_{(k)i}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \overline{\omega}_{(k)i} \cdot A_{(k)i}}{\sum_{i=1}^{n} A_{(k)i}}, \quad (1)$$

т. е.

$$\omega_k = \sum_{i=1}^{n} (\overline{\omega}_{(k)i} \cdot \alpha_{(k)i}), \quad (2)$$

где $W_{(k)i}$ – расход энергии в i-м кванте k-го участка, кВт·ч;

$A_{(k)i}$ – работа, выполненная в i-м кванте k-го участка, 10^4 ткм;

n – количество квантов массы поезда на ось;

i – порядковый номер кванта массы на ось;

k – номер участка работы локомотивных бригад;

$\overline{\omega}_{(k)i}$ – среднее значение удельного расхода электроэнергии в i-м кванте k-го участка, кВт·ч/10^4 ткм,

$$\overline{\omega}_{(k)i} = \frac{W_{(k)i}}{A_{(k)i}}, \quad (3)$$

$\alpha_{(k)i}$ – доля тонно-километровой работы в i-м кванте k-го участка относительно суммарной работы в целом по участку, о.е.:

$$\alpha_{(k)i} = \frac{A_{(k)i}}{\sum_{i=1}^{n} A_{(k)i}}. \quad (4)$$

В соответствии с формулами (1) – (4) проводится расчет УРЭ на тягу поездов по участкам раздельно для поездок в соответствующем режиме использования системы УСАВП ω_k^y, кВт·ч/10^4 ткм:

$$\omega_k^y = \sum_{i=1}^{n} (\overline{\omega}_{(k)i}^y \cdot \alpha_{(k)i}^y), \quad (5)$$

где $\overline{\omega}^{y}_{(k)i}$ – среднее значение удельного расхода электроэнергии в i-м кванте k-го участка в соответствующем режиме использования УСАВП y, кВт·ч/10^4 ткм;

$\alpha^{y}_{(k)i}$ – доля тонно-километровой работы в i-м кванте k-го участка относительно суммарной работы в целом по выборке в соответствующем режиме использования УСАВП, о. е.

На основании полученных значений УРЭ по поездо-участкам выполняется расчет УРЭ в целом по депо, кВт·ч/10^4 ткм:

$$\omega^{y}_{\partial} = \sum_{j=1}^{m}\left(\omega^{y}_{(k)j}\cdot\beta_j\right), \tag{6}$$

где $\omega^{y}_{(k)j}$ – УРЭ на тягу поездов в соответствующем режиме использования УСАВП по j-му участку, кВт·ч/10^4 ткм;

β_j – доля работы j-го участка в общем объеме работы депо в грузовом движении;

m – количество участков работы локомотивных бригад.

Расчет снижения эксплуатационных расходов на оплату электроэнергии за счет снижения ее потребления на тягу поездов рассматриваемого локомотивного депо описывается выражением, р.:

$$\Delta Э^{ээ}_{уд} = T^{ср}_{ээ}\cdot\left(\omega^{25}_{д}\cdot A^{100} - \omega^{100}_{д}\cdot A^{100}\right) = T^{ср}_{ээ}\cdot A^{100}\cdot\left(\omega^{25}_{д} - \omega^{100}_{д}\right), \tag{7}$$

где $T^{ср}_{ээ}$ – средневзвешенный тариф на электрическую энергию на тягу поездов по депо (р./кВт·ч);

A^{100} – суммарная работа по депо, выполненная электропоездами в режиме использования автоведения более 75 %, 10^4 ткм;

ω^{25} – удельный расход электроэнергии по депо в режиме использования автоведения менее 25 %, кВт·ч/10^4 ткм;

ω^{100} – удельный расход электроэнергии по депо в режиме использования автоведения более 75 %, кВт·ч/10^4 ткм.

Вторым шагом в определении эффективности использования УСАВП является расчет величины снижения эксплуатационных расходов за счет высвобождения штата помощников машинистов. Следует отметить, что данная составляющая эффекта достигается только при утверждении в депо решения ездить «в одно лицо». При этом снижаются эксплуатационные расходы за счет высвобождения штата помощников машинистов.

Снижение заработной платы в результате перехода на управление «в одно лицо» может быть рассчитано следующим образом:

$$\Delta C_{з.пл} = \left(C_{з.пл.1л} - k_р T_м k_{1л} t_{1л} - C_{доп.м}\right)\left(1 + \frac{T_{п.м}}{T_м}\right) - C_{з.пл.1л} + C_{доп.п.м}, \tag{8}$$

где $C_{з.пл.1л}$ – суммарные расходы на заработную плату машинистам, управляющим локомотивом «в одно лицо», за расчетный период, р.;

$k_р$ – районный коэффициент;

$T_м$ – часовая тарифная ставка машиниста, р./ч;

$k_{1л}$ – процент доплаты за управление локомотивом «в одно лицо», %;

$t_{1л}$ – часы, отработанные «в одно лицо;

$C_{доп.м}$ – дополнительные расходы, напрямую не связанные с количеством отработанных часов, рассчитанные для машиниста, р.;

$T_{п.м}$ – часовая тарифная ставка помощника машиниста, р./ч;

$C_{доп.п.м}$ – дополнительные расходы, напрямую не связанные с количеством отработанных часов, рассчитанные для помощника машиниста, р.

Величина снижения заработной платы $\Delta C_{з.пл}$ является основой для расчета снижения эксплуатационных расходов за счет высвобождения штата помощников машинистов, которые можно определить по формуле:

$$\Delta Э_{шт} = \Delta C_{з.пл}\left(\frac{100 + k_{с.в} + k_{травм} + k_{страх} + k_{пр}}{100}\right)\cdot\eta + \frac{N_{раб.1л}C_{ф.о}}{12}, \quad (9)$$

где $k_{с.в}$ – коэффициент, учитывающий расходы локомотивного депо в отчетном периоде на уплату страховых взносов;

$k_{травм}$ – коэффициент, учитывающий расходы локомотивного депо в отчетном периоде на уплату взноса на обязательное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

$k_{страх}$ – коэффициент, учитывающий платежи железной дороги в отчетном периоде по договорам добровольного страхования жизни высвобождаемых работников;

$k_{пр}$ – коэффициент, учитывающий прочие (накладные) расходы локомотивного депо в отчетном периоде;

η – коэффициент увеличения расходов локомотивного депо, связанных с оплатой труда явочных локомотивных бригад, на содержание резерва локомотивных бригад;

$N_{раб.1л}$ – количество машинистов, управляющих локомотивом «в одно лицо»;

$C_{ф.о}$ – стоимость одного комплекта форменной одежды по данным бухгалтерии, предъявляемых в отделе материально-технического снабжения отделения дороги.

Значение суммарной величины снижения эксплуатационных расходов, обусловленной внедрением в рассматриваемом локомотивном депо технологии автоведения поездов, рассчитывается по выражению:

$$\Delta Э = \Delta Э_{уд} + \Delta Э_{шт} - \Delta C_{экспл}, \quad (10)$$

где $\Delta C_{экспл}$ – эксплуатационные расходы на поддержание систем УСАВП в исправном состоянии.

Анализ результатов расчетов, выполняемых в соответствии с методикой, позволяет определить условия, при которых достигается максимальный эффект при использовании систем УСАВП. В грузовом движении наибольший эффект достигается на участках с равнинным профилем. Результаты оценки эффекта в зависимости от нагрузки на ось приведены в таблице.

Сравнение удельного расхода при различных режимах использования УСАВП в зависимости от нагрузки на ось поезда

Нагрузка на ось поезда	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч / ткм		Снижение удельного расхода за счет использования УСАВП, %
	Без использования УСАВП	С использованием УСАВП	
Менее 9 т	126,9	129,6	-2,1 %
От 9 до 15 т	66,9	73,3	-9,5 %
От 15 до 21 т	62,2	57,7	7,3 %
Более 21 т	49,0	48,9	0,3 %

Оценка технико-экономического эффекта внедрения УСАВП основана на статистической обработке большого объема исходных данных. В связи с этим разработан программный комплекс «АРМ ЭЭ-УСАВП», позволяющий в автоматизированном режиме осуществлять обработку исходных данных по оценке удельного расхода электроэнергии на тягу поездов, осуще-

ствлять расчет экономического эффекта, а также формировать квартальный отчет НТО-4 (рисунок 2). Следует отметить, что программный комплекс также позволяет выполнить проверку отчетных данных систем РПДА.

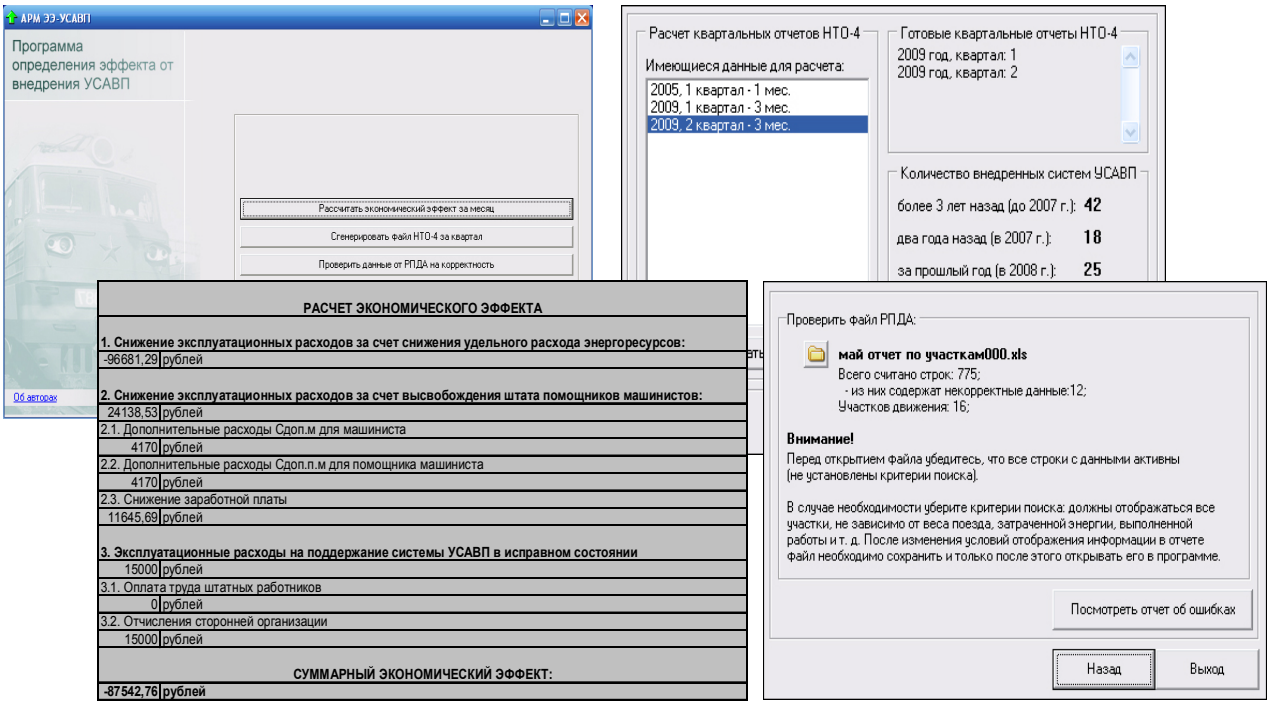


Рисунок 2 – Структура программного комплекса «АРМ ЭЭ-УСАВП»

Программный комплекс по расчету экономии эксплуатационных расходов от использования систем автоведения с регистратором параметров движения поезда, внедряемых на тяговом подвижном составе («АРМ ЭЭ-УСАВП») разработан в среде программирования *Borland Delphi 6.0* с широким использованием *Microsoft Office Excel 2003*.

Список литературы

1. Системы автоведения, регистрации параметров движения и работы тягового подвижного состава [Текст]. Обзорное пособие. ООО «АВП-Технология». М., 2009. – 96 с.

2. Технико-экономическое обоснование внедрения мероприятия программы ресурсосбережения «Автомашинист электротяги пассажирское движение» [Текст]. ЗАО «ОЦВ». – М., 2005. – 11 с.

3. Сидорова, Е. А. Разработка системы нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов на основе исследования статистических закономерностей [Текст]: Дис… канд. техн. наук / Омский институт инженеров железнодорожного транспорта. Омск, 1991. – 198 с.

УДК 621.331:621.311.4:621.314.5

О. О. Комякова, Т. В. Комякова

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В ИНВЕРТОРНОМ РЕЖИМЕ, ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

В работе выполнен гармонический анализ сетевого тока двенадцатипульсового выпрямительно-инверторного преобразователя с последовательным соединением шестипульсовых мостовых секций, работающего в инверторном режиме, при несимметричном несинусоидальном напряжении питающей сети.

В большинстве случаев напряжение энергосистемы, питающей тяговые подстанции постоянного тока электрифицированных железных дорог с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИПами), является несимметричным и несинусоидальным, что оказывает существенное влияние на их работу в режимах выпрямления и инвертирования. Для оценки такого влияния, а также для учета электрической энергии, возвращаемой в сети энергосистем, при взаиморасчетах с энергоснабжающей организацией необходим гармонический анализ сетевого тока ВИПов при различных режимах работы питающей системы.

Рассмотрим влияние несимметричного несинусоидального питающего напряжения на сетевой ток двенадцатипульсового инвертора с последовательным соединением шестипульсовых мостовых секций. Результаты исследования сетевого тока мостового шестипульсового инвертора при несимметричном и несинусоидальном питающем напряжении представлены в работах [1, 2].

При рассмотрении электромагнитных процессов двенадцатипульсового выпрямительно-инверторного преобразователя необходимо учитывать, что при конструировании преобразовательных трансформаторов с расщепленными вентильными обмотками, соединенными по схемам звезды и треугольника, всегда будет наблюдаться несимметрия системы линейных напряжений вентильных обмоток, которую называют конструктивной несимметрией и оценивают коэффициентом α_k.

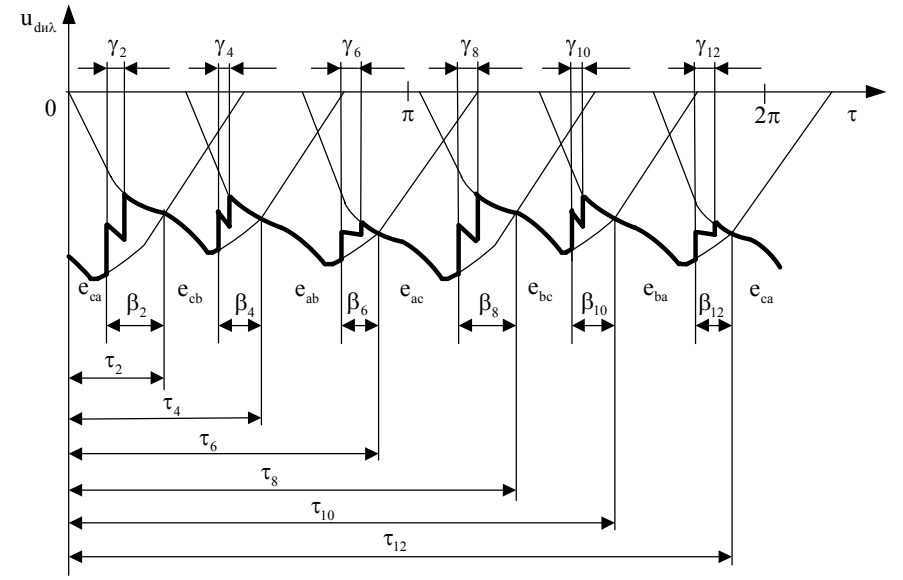
Метод определения системы несимметричных питающих напряжений при работе выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций приведен в работе [3].

Исследование основано на рассмотрении выпрямительно-инверторного преобразователя как генератора гармоник для цепей постоянного и переменного тока, поэтому в дальнейших рассуждениях вместо понятий «напряжение питающей системы» и «напряжение вентильной обмотки преобразовательного трансформатора» применяются понятия «ЭДС питающей системы» и «ЭДС вентильной обмотки преобразовательного трансформатора».

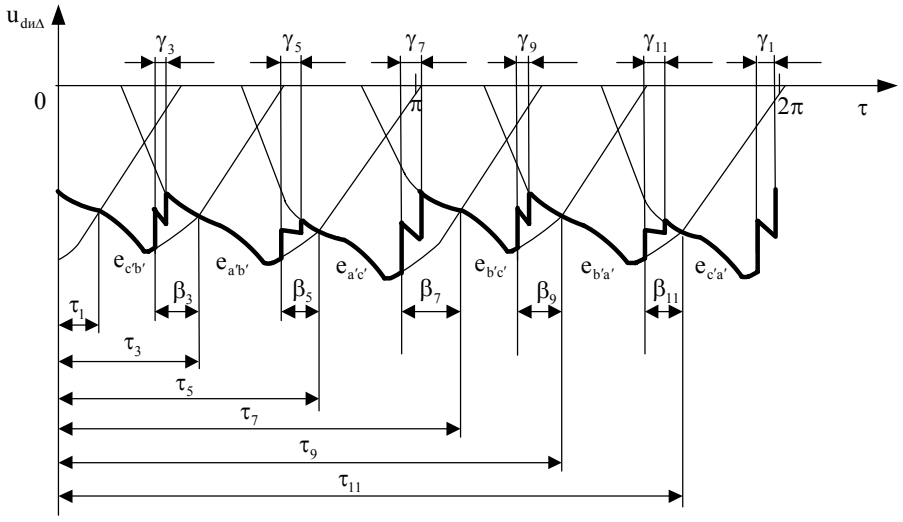
Кривые противоЭДС в вентильных обмотках, собранных по схеме звезды и треугольника, и кривая сетевого тока (например, для фазы А) двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении в режиме нагрузки изображены на рисунке 1.

Линейные ЭДС вентильной обмотки преобразовательного трансформатора инвертора, соединенной в треугольник, определяются по формулам:

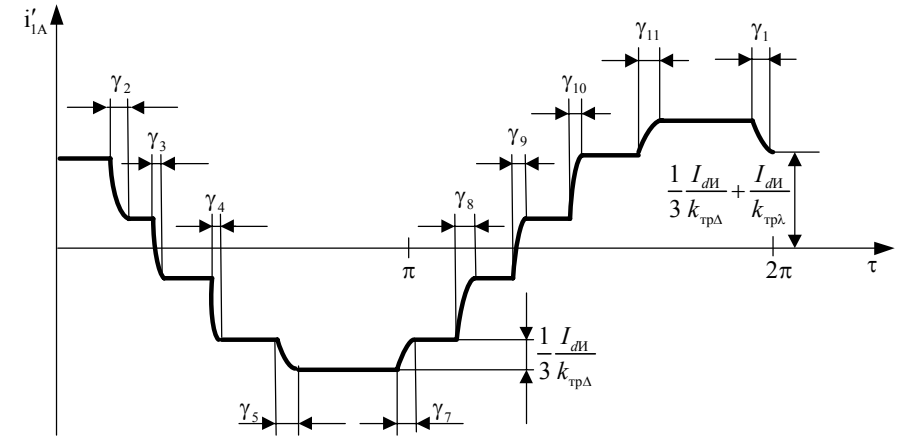
$$\begin{cases} e_{a'c'} = -\sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{a'c'(\nu)} \cos(\nu\tau - \psi_{A(\nu)}); \\ e_{c'в'} = -\sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{c'b'(\nu)} \cos(\nu\tau + \psi_{C(\nu)}); \\ e_{в'a'} = -\sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{b'a'(\nu)} \cos(\nu\tau + \psi_{B(\nu)}); \\ e_{c'a'} = -e_{a'c'};\ e_{в'c'} = -e_{c'в'};\ e_{a'в'} = -e_{в'a'}; \end{cases} \quad (1)$$



а



б



в

Рисунок 1 – Кривые противоЭДС в вентильных обмотках, собранных по схеме звезды (а) и треугольника (б), и кривая сетевого тока (в) двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении в режиме нагрузки

соединенной в звезду –

$$\begin{cases} e_{ac} = -\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{ac(\nu)} \cos(\nu\tau - \psi_{A(\nu)} \pm \nu\varphi_{ac(\nu)}); \\ e_{cв} = -\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{cb(\nu)} \cos(\nu\tau + \psi_{C(\nu)} \pm \nu\varphi_{cb(\nu)}); \\ e_{вa} = -\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2} E_{ba(\nu)} \cos(\nu\tau + \psi_{B(\nu)} \pm \nu\varphi_{ba(\nu)}); \\ e_{ca} = -e_{ac};\ e_{вc} = -e_{cв};\ e_{aв} = -e_{вa}, \end{cases} \quad (2)$$

где $E_{a'c'(\nu)}$, $E_{c'b'(\nu)}$, $E_{b'a'(\nu)}$, $E_{ac(\nu)}$, $E_{cb(\nu)}$, $E_{ba(\nu)}$ – модули комплексных действующих значений линейных ЭДС ν-й гармоники вентильных обмоток преобразовательного трансформатора, соединенных соответственно по схеме треугольника и звезды;

$\varphi_{ac(\nu)}$, $\varphi_{cb(\nu)}$, $\varphi_{ab(\nu)}$ – углы сдвига между одноименными фазными и линейными ЭДС ν-й гармоники вентильной обмотки;

$\psi_{A(\nu)}, \psi_{B(\nu)}, \psi_{C(\nu)}$ – углы сдвига фазных ЭДС ν-й гармоники по отношению к первой для фазы А, вычисляемые по формулам:

$$\psi_{B(\nu)} = \pi \mp C_{(\nu)} - \psi_{A(\nu)}; \quad (3)$$

$$\psi_{C(\nu)} = \pi \pm B_{(\nu)} - \psi_{A(\nu)} \quad (4)$$

где $C_{(\nu)}$, $B_{(\nu)}$ – углы треугольника несимметричных питающих ЭДС ν-й гармоники [3].

Нижний знак в выражениях (3, 4) относится к гармоникам прямой последовательности (1, 7, 13), а верхний – обратной (5, 11, 17 …).

Комплексные значения $E_{a'c'(\nu)}$, $E_{c'b'(\nu)}$, $E_{b'a'(\nu)}$ рассчитываются по формулам:

$$\dot{E}_{a'c'(\nu)} = \frac{\dot{E}_{A(\nu)}}{k_{\text{тр}\Delta}}; \quad (5)$$

$$\dot{E}_{b'a'(\nu)} = \frac{\dot{E}_{B(\nu)}}{k_{\text{тр}\Delta}}; \quad (6)$$

$$\dot{E}_{c'b'(\nu)} = \frac{\dot{E}_{C(\nu)}}{k_{\text{тр}\Delta}}, \quad (7)$$

где $\dot{E}_{A(\nu)}$, $\dot{E}_{B(\nu)}$, $\dot{E}_{C(\nu)}$ – комплексные фазные ЭДС питающей сети ν-й гармоники, рассчитываемые по методу, рассмотренному в работе [3];

$k_{\text{тр}\Delta}$ – коэффициент трансформации обмотки преобразовательного трансформатора, соединенной по схеме треугольника. С учетом конструктивной несимметрии коэффициент трансформации можно найти из соотношения:

$$k_{\text{тр}\Delta} = \frac{k_{\text{тр}\lambda}(1-\alpha_k)}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{тр}\lambda}$ – коэффициент трансформации обмотки преобразовательного трансформатора, соединенной по схеме звезды.

Углы сдвига между одноименными фазными и линейными ЭДС ν-й гармоники вентильной обмотки определяются по выражениям:

$$\begin{cases} \varphi_{ac(\nu)} = \arccos \dfrac{E^2_{a(\nu)} + E^2_{ac(\nu)} - E^2_{c(\nu)}}{2E_{a(\nu)}E_{ac(\nu)}}; \\ \varphi_{ba(\nu)} = \arccos \dfrac{E^2_{b(\nu)} + E^2_{ba(\nu)} - E^2_{a(\nu)}}{2E_{b(\nu)}E_{ba(\nu)}}; \\ \varphi_{cb(\nu)} = \arccos \dfrac{E^2_{c(\nu)} + E^2_{cb(\nu)} - E^2_{b(\nu)}}{2E_{c(\nu)}E_{cb(\nu)}}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\dot{E}_{a(\nu)}$, $\dot{E}_{b(\nu)}$, $\dot{E}_{c(\nu)}$ – комплексные фазные ЭДС ν-й гармоники вентильной обмотки преобразовательного трансформатора, соединенной по схеме звезды.

Для определения длительности протекания сетевого тока в фазах преобразовательного трансформатора двенадцатипульсового ВИП при работе в инверторном режиме рассчитаем моменты открытия вентилей τ_i. Исходя из условия, что в момент коммутации мгновенные значения противоЭДС смежных пульсаций вентильной обмотки равны по значению, запишем выражения для определения моментов открытия вентилей инвертора τ_1 ($e_{c'a'} = e_{c'b'}$) (рисунок 1, б):

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2}\Big(E_{a'c'(\nu)}\cos(-\psi_{A(\nu)}) + E_{c'b'(\nu)}\cos(\psi_{C(\nu)}) - \\ -\mathrm{tg}\nu\tau_1(E_{a'c'(\nu)}\sin(-\psi_{A(\nu)}) + E_{c'b'(\nu)}\sin(\psi_{C(\nu)})\Big) = 0; \quad (10)$$

для τ_2 ($e_{ca} = e_{cb}$) –

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2}\Big(E_{ac(\nu)}\cos(-\psi_{A(\nu)} \pm \nu\varphi_{ac(\nu)}) + E_{cb(\nu)}\cos(\psi_{C(\nu)} \pm \nu\varphi_{cb(\nu)}) - \\ -\mathrm{tg}\nu\tau_2(E_{ac(\nu)}\sin(-\psi_{A(\nu)} \pm \nu\varphi_{ac(\nu)}) + E_{cb(\nu)}\sin(\psi_{C(\nu)} \pm \nu\varphi_{cb(\nu)})\Big) = 0; \quad (11)$$

для τ_3 ($e_{c'b'} = e_{a'b'}$) –

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2}\Big(E_{b'a'(\nu)}(\cos(\psi_{B(\nu)}) + E_{c'b'(\nu)}\cos(\psi_{C(\nu)}) - \\ -\mathrm{tg}\nu\tau_3(E_{b'a'(\nu)}\sin(\psi_{B(\nu)}) + E_{c'b'(\nu)}\sin(\psi_{C(\nu)})\Big) = 0; \quad (12)$$

для τ_4 ($e_{cb} = e_{ab}$) –

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2}\Big(E_{ba(\nu)}(\cos(\psi_{B(\nu)} \pm \nu\varphi_{ba(\nu)}) + E_{cb(\nu)}\cos(\psi_{C(\nu)} \pm \nu\varphi_{cb(\nu)}) - \\ -\mathrm{tg}\nu\tau_4(E_{ba(\nu)}\sin(\psi_{B(\nu)} \pm \nu\varphi_{ba(\nu)}) + E_{cb(\nu)}\sin(\psi_{C(\nu)} \pm \nu\varphi_{cb(\nu)})\Big) = 0; \quad (13)$$

для τ_5 ($e_{a'b'} = e_{a'c'}$) –

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2}\Big(E_{b'a'(\nu)}\cos(\psi_{B(\nu)}) + E_{a'c'(\nu)}\cos(-\psi_{A(\nu)}) - \\ -\mathrm{tg}\nu\tau_5(E_{b'a'(\nu)}\sin(\psi_{B(\nu)}) + E_{a'c'(\nu)}\sin(-\psi_{A(\nu)})\Big) = 0; \quad (14)$$

для τ_6 ($e_{ab} = e_{ac}$) –

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2}\Big(E_{ba(\nu)}\cos(\psi_{B(\nu)} \pm \nu\varphi_{ab(\nu)}) + E_{ac(\nu)}\cos(-\psi_{A(\nu)} \pm \nu\varphi_{ac(\nu)}) - \\ -\mathrm{tg}\nu\tau_6(E_{ba(\nu)}\sin(\psi_{B(\nu)} \pm \nu\varphi_{ab(\nu)}) + E_{ac(\nu)}\sin(-\psi_{A(\nu)} \pm \nu\varphi_{ac(\nu)})\Big) = 0. \quad (12)$$

Остальные моменты естественного открытия вентилей определяются с учетом периода кривой противоЭДС отдельно для каждой секции двенадцатипульсового инвертора, который равен π, и рассчитываются в математической среде Mathcad.

Углы коммутации вентильных токов двенадцатипульсового инвертора γ_i при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении различны и рассчитываются с использованием метода простых итераций. Для нахождения углов коммутации необходимо принять следующие допущения [4]:

1) углы коммутации незначительно зависят от индуктивности цепи постоянного тока, и практически для вычисления этих углов можно пользоваться формулами, выведенными для случая, когда индуктивность цепи постоянного тока равна бесконечности;

2) вся индуктивность цепи переменного тока, т. е. индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток преобразовательного трансформатора, понизительного трансформатора и сети, сосредоточена во вторичной обмотке трансформатора.

С учетом принятых допущений и конструктивной несимметрии составлены математические модели электромагнитных процессов в двенадцатипульсовом инверторе, которые представлены в виде системы дифференциальных уравнений и основаны на методе расчета сложной цепи с применением законов Кирхгофа.

Математическая модель для определения угла коммутации вентильных токов γ_1 обмотки, соединенной по схеме треугольника, представлена в виде:

$$\begin{aligned}
&\sum_{\nu=0}^{\infty}\Bigg[\cos(\nu\gamma_1-1)\Bigg(\sin(\nu(\tau_1-(\beta_1+\gamma_1)))\Bigg[\frac{\sqrt{2}E_{a'c'(\nu)}}{\nu}\cos(-\psi_{A(\nu)})+\\
&+\frac{\sqrt{2}E_{c'b'(\nu)}}{\nu}\cos(\psi_{C(\nu)})\Bigg]+\Bigg[\frac{\sqrt{2}E_{a'c'(\nu)}}{\nu}\sin(-\psi_{A(\nu)})+\frac{\sqrt{2}E_{c'b'(\nu)}}{\nu}\sin(\psi_{C(\nu)})\Bigg]\cdot\\
&\cdot\cos(\nu(\tau_1-(\beta_1+\gamma_1))))\Bigg)+\sin(\nu\gamma_1)\Bigg(\Bigg[\frac{\sqrt{2}E_{a'c'(\nu)}}{\nu}\cos(-\psi_{A(\nu)})+\\
&+\frac{\sqrt{2}E_{c'b'(\nu)}}{\nu}\cos(\psi_{C(\nu)})\Bigg]\cos(\nu(\tau_1-(\beta_1+\gamma_1)))-\Bigg[\frac{\sqrt{2}E_{a'c'(\nu)}}{\nu}\sin(-\psi_{A(\nu)})+\\
&+\frac{\sqrt{2}E_{c'b'(\nu)}}{\nu}\sin(\psi_{C(\nu)})\Bigg]\sin(\nu(\tau_1-(\beta_1+\gamma_1)))\Bigg)\Bigg]-\frac{2X_{в\Delta}I_{dИ}}{K_{сх}}=0,
\end{aligned}\tag{15}$$

где $I_{dИ}$ – ток нагрузки выпрямительно-инверторного преобразователя;

β_1 – угол опережения открытия тиристоров (см. рис. 1) изменяется по закону $\beta_i=\beta_0+\gamma_i$ и определяется методом последовательного приближения;

β_0 – начальное значение угла опережения открытия вентилей;

$K_{сх}$ – коэффициент схемы (для двенадцатипульсовой схемы последовательного типа $K_{сх}=1$);

$X_{в\Delta}$, $X_{в\lambda}$ – суммарные индуктивные сопротивления питающей системы, понижающего и преобразовательного трансформаторов, приведенные к напряжению вентильных обмоток преобразовательного трансформатора, соединенных по схеме треугольника и звезды, связанные между собой выражением:

$$X_{в\Delta}=\frac{X_{в\lambda}}{(1-\alpha_k)^2}\,. \tag{16}$$

Математическая модель для определения угла коммутации вентильных токов γ_2 обмотки, соединенной по схеме звезды, имеет вид:

$$\sum_{\nu=0}^{\infty}\Bigg[\cos(\nu\gamma_2-1)\Bigg(\sin(\nu(\tau_2-(\beta_2+\gamma_2)\Bigg[\frac{\sqrt{2}E_{ac(\nu)}}{\nu}\cos(-\psi_{A(\nu)}\pm\nu\varphi_{ac(\nu)})+$$
$$+\frac{\sqrt{2}E_{cb(\nu)}}{\nu}\cos(\psi_{C(\nu)}\pm\nu\varphi_{cb(\nu)})\Bigg]+\Bigg[\frac{\sqrt{2}E_{ac(\nu)}}{\nu}\sin(-\psi_{A(\nu)}\pm\nu\varphi_{ac(\nu)})+$$
$$+\frac{\sqrt{2}E_{cb(\nu)}}{\nu}\sin(\psi_{C(\nu)}\pm\nu\varphi_{cb(\nu)})\Bigg]\cos(\nu(\tau_2-(\beta_2+\gamma_2)\Bigg)+\sin(\nu\gamma_2)\cdot$$
$$\cdot\Bigg(\Bigg[\frac{\sqrt{2}E_{ac(\nu)}}{\nu}\cos(-\psi_{A(\nu)}\pm\nu\varphi_{ac(\nu)})+\frac{\sqrt{2}E_{cb(\nu)}}{\nu}\cos(\psi_{C(\nu)}\pm\nu\varphi_{cb(\nu)})\Bigg]\qquad(17)$$
$$\cos(\nu(\tau_2-(\beta_2+\gamma_2)-\Bigg[\frac{\sqrt{2}E_{ac(\nu)}}{\nu}\sin(-\psi_{A(\nu)}\pm\nu\varphi_{ac(\nu)})+$$
$$+\frac{\sqrt{2}E_{cb(\nu)}}{\nu}\sin(\psi_{C(\nu)}\pm\nu\varphi_{cb(\nu)})\Bigg]\sin(\nu(\tau_2-(\beta_2+\gamma_2)\Bigg)\Bigg]-\frac{2X_{\text{вл}}I_{d\text{И}}}{K_{\text{сх}}}=0.$$

Остальные углы коммутации определяются аналогичным образом и рассчитываются в среде Mathcad. С учетом периода кривой противоЭДС можно принять: $\gamma_7=\gamma_1$, $\gamma_8=\gamma_2$, $\gamma_9=\gamma_3$, $\gamma_{10}=\gamma_4$, $\gamma_{11}=\gamma_5$, $\gamma_{12}=\gamma_6$.

Математические модели позволяют рассчитать углы коммутации γ_i с учетом значений ЭДС питающей системы при различных режимах ее работы, что, в свою очередь, дает возможность определения спектрального состава гармоник сетевого тока.

Из рисунка 1 видно, что кривая сетевого тока двенадцатипульсового выпрямительно-инверторного преобразователя является непрерывной и состоит из нескольких криволинейных и прямолинейных участков. Описание кривой сетевого тока двенадцатипульсового инвертора с учетом нелинейного характера его изменения в периоды коммутации на интервале от нуля до 2π и выражения для расчета действующих значений гармоник сетевого тока посредством разложения функции тока в комплексный ряд Фурье рассмотрены в работе [5].

Кривую сетевого тока характеризуют коэффициентом *ν*-й гармонической составляющей $K_{I(\nu)}$, который равен отношению действующего значения гармоники *ν*-го порядка к первой гармонике сетевого тока, и коэффициентом искажения синусоидальности K_I.

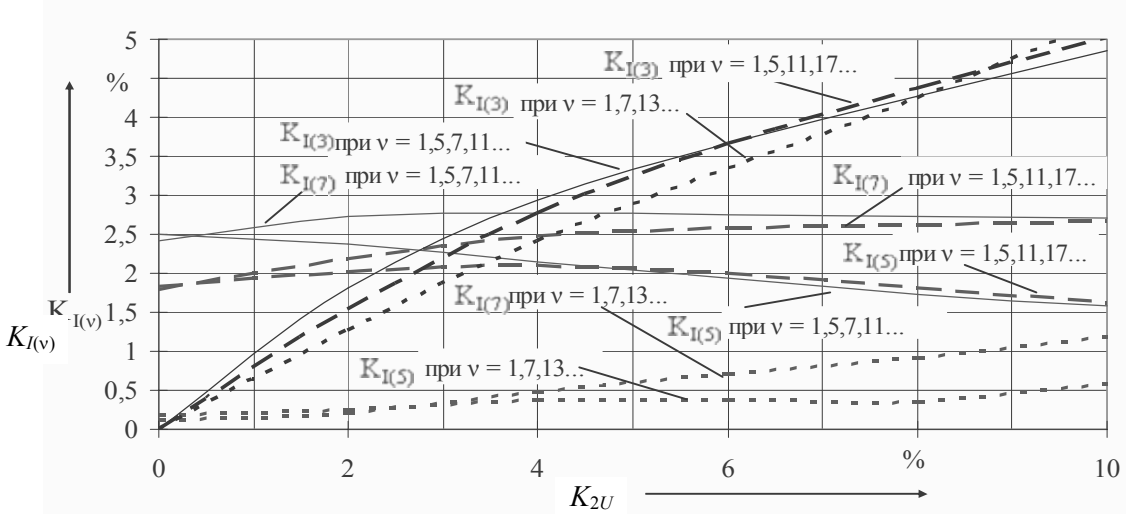
Численные значения $K_{I(\nu)}$ для двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении в режиме номинальной нагрузки при коэффициенте несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности $K_{2U}=2\ \%$ с учетом конструктивной несимметрии вентильных обмоток трансформатора $\alpha_k=2\ \%$ приведены в таблице. Из данных таблицы следует, что при несимметричном питающем напряжении несинусоидальность приводит к увеличению численных значений неканонических гармоник (3, 5, 7, 9…) и незначительно влияет на характер изменения канонических (11, 13, 23, 25…).

Характер изменения неканонических и канонических гармоник сетевого тока двенадцатипульсового инвертора для фазы А с увеличением коэффициента K_{2U} при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении в режиме номинальной нагрузки приведен на рисунке 2, а, б.

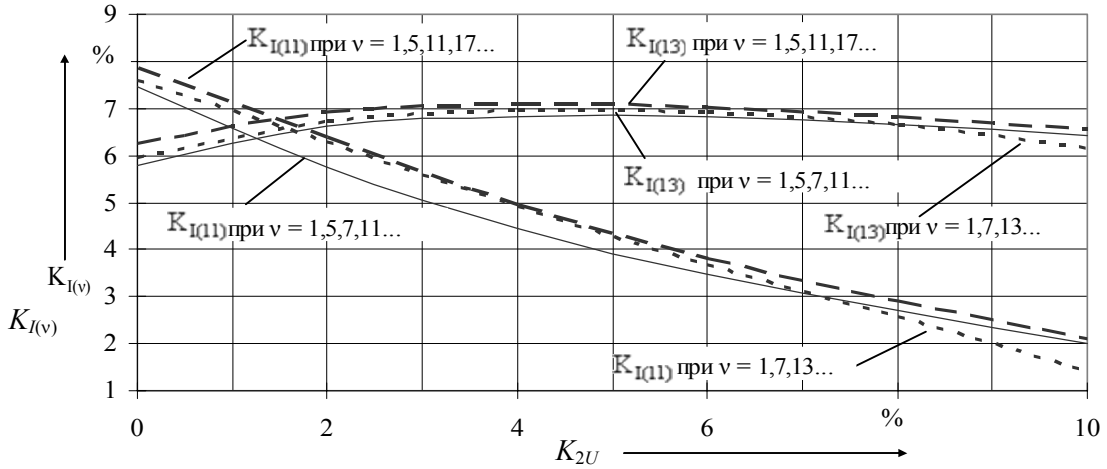
Из рисунка 2 видно, что для двенадцатипульсового инвертора при несинусоидальном питающем напряжении с увеличением коэффициента несимметрии неканонические гармоники, кратные трем, увеличиваются, а канонические уменьшаются.

Коэффициент ν-й гармонической составляющей кривой сетевого тока фазы А двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении в режиме номинальной нагрузки

Порядок гармоники ν	Значения $K_{I(\nu)}$, %, при наличии в питающей системе гармоник			
	1	1, 7, 13 …	1, 5, 11, 17…	1, 5, 7, 11 …
1	100,00	100,00	100,00	100,00
3	0,98	1,28	1,54	1,82
5	0,19	0,26	2,03	2,38
7	0,17	0,20	2,18	2,73
9	0,80	1,06	1,29	1,46
11	6,65	6,30	6,39	5,74
13	6,60	6,71	6,94	6,61
15	0,77	1,05	1,18	1,32
17	0,06	0,15	1,38	1,31
19	0,05	0,12	1,79	2,14
21	0,38	0,57	0,64	0,74
23	1,28	0,91	1,22	0,77
25	1,66	1,71	1,79	1,18
27	0,36	0,69	0,39	0,51
29	0,06	0,20	0,70	0,35



а



б

Рисунок 2 – Коэффициент $K_{I(\nu)}$ сетевого тока фазы А двенадцатипульсового инвертора для неканонических (а) и канонических (б) гармоник при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении в режиме номинальной нагрузки

Характер изменения коэффициента K_I для фазы А с увеличением коэффициента несимметрии в режиме номинальной нагрузки и при наличии в питающей системе гармоник (1, 5, 7, 11, 13 …) приведен на рисунке 3.

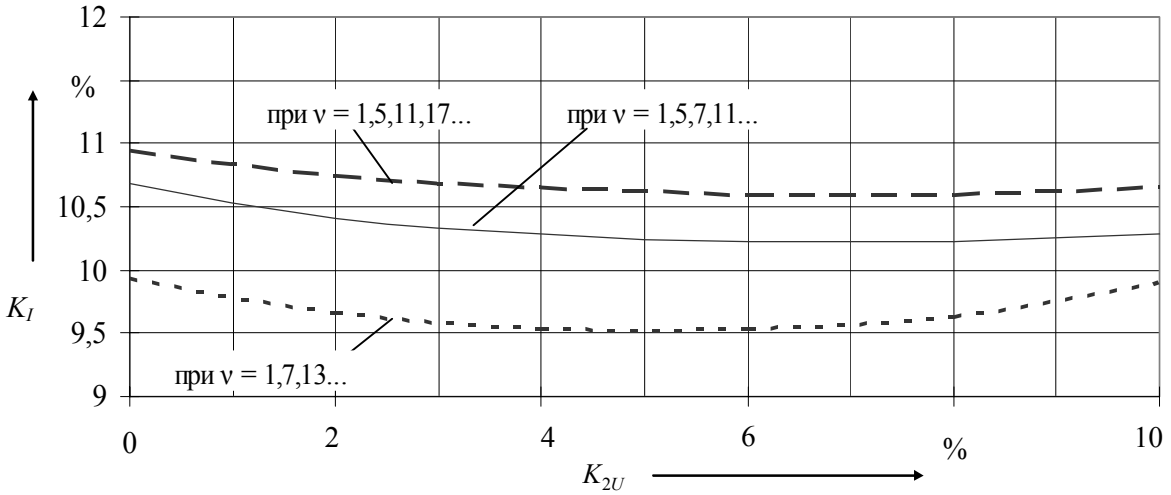


Рисунок 3 – Коэффициент искажения синусоидальности кривой сетевого тока фазы А двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении в режиме номинальной нагрузки

Сравнивая численные значения коэффициента $K_{I(\nu)}$ шести- и двенадцатипульсового преобразователей [1, 2], можно отметить, что гармоники, канонические для обоих преобразователей, близки по значению друг другу, а все остальные у двенадцатипульсового инвертора в несколько раз меньше, чем у шестипульсового.

Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой сетевого тока при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении для двенадцатипульсового инвертора при номинальной нагрузке практически в два раза меньше, чем для шестипульсового.

Таким образом, использование двенадцатипульсового инвертора способствует улучшению качества электрической энергии в питающей системе по сравнению с шестипульсовым

Список литературы

1. Комякова, О. О. Сетевой ток зависимого шестипульсового инвертора при несимметричном напряжении питающей сети [Текст] / О. О. Комякова // Обеспечение экономически целесообразных условий работы железных дорог на основе оптимизации режимов работы электрических комплексов: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2008.

2. Комякова, О. О. Сетевой ток шестипульсового инвертора при симметричных несинусоидальных питающих напряжениях [Текст] / О. О. Комякова // Современные техника и технологии: XIV междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: Сб. тр. / Томский политехн. ун-т. Томск, 2008.

3. Комякова, О. О. Метод определения несимметричных питающих напряжений при работе выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций / О. О. Комякова // Межвуз. сб. тр. молодых ученых, аспирантов и студентов / Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. – Омск, , 2008. – Вып. 5. – Ч. 1. – С. 153 – 159.

4. Маценко, В. П. Определение ЭДС гармонических составляющих зависимого шестифазного инвертора при несимметричных напряжениях системы переменного тока [Текст] /

В. П. Маценко, А. П. Козлов // Энергоснабжение электрических железных дорог: Сб. науч. тр./ Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1974. – С.116 – 122.

5. Черемисин, В. Т. Влияние несимметрии питающих напряжений на сетевой ток преобразователя, работающего в инверторном режиме [Текст] / В. Т. Черемисин, О. О. Комякова // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2008. – № 3. – С. 99 – 105.

УДК 621.331.5

Ю. В. Кондратьев, С. Я. Привалов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОРА МЕСТ УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ И ПРОТЕКАНИЯ УРАВНИТЕЛЬНЫХ ТОКОВ

В статье рассматриваются недостатки существующего метода расчета параметров устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности в условиях рекуперативного торможения и протекания уравнительных токов. На примере имитационного моделирования реального участка электрифицированной железной дороги переменного тока показаны расчет параметров и выбор места установки устройств компенсации реактивной мощности.

Электрические железные дороги переменного тока являются мощной нелинейной нагрузкой, вызывающей снижение качества электроэнергии (КЭ) в системе как внешнего, так и нетягового электроснабжения, получающей питание от шин тяговых подстанций. Это вызвано следующими причинами [1]: во-первых, в режиме тяги электроподвижной состав переменного тока, оборудованный однофазными двухполупериодными выпрямительными агрегатами, потребляя электроэнергию на основной частоте, является генератором высших гармонических составляющих, возвращаемых в питающую сеть; во-вторых, в режиме рекуперативного торможения электроподвижной состав генерирует в тяговую сеть токи как основной частоты, так и высших гармонических составляющих, причем относительная составляющая токов высших гармонических составляющих в режиме рекуперации значительно больше, чем в режиме тяги.

Ухудшение КЭ, обусловленное режимами работы системы тягового электроснабжения, может повлечь за собой надбавки к основному тарифу со стороны питающих энергосистем по таким показателям, как коэффициент искажения синусоидальности кривой питающего напряжения, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, а со стороны потребителей, получающих питание от шин тяговых подстанций, также и по установившемуся отклонению напряжения. Кроме того, ухудшение указанных показателей качества электрической энергии (ПКЭ) оказывает негативное влияние на устройства автоматики, телемеханики и связи, а также на электрооборудование стационарных объектов железнодорожного транспорта.

К значительному снижению КЭ приводит тенденция увеличения массы поезда до 9 000 – 12 000 тыс. т с применением систем автоматизированного ведения распределенных по длине состава локомотивов.

Из изложенного выше следует, что улучшение ПКЭ с помощью устройств компенсации реактивной мощности в условиях применения рекуперативного торможения и протекания уравнительных токов (УТ) является важнейшей задачей исследования.

Степень влияния рекуперации и протекания уравнительного тока на ПКЭ может быть определена на основании натурных экспериментов. Проведение таких экспериментов в границах полигона переменного тока сети железных дорог является трудоемким и дорогостоя-

щим мероприятием. Кроме того, натурные эксперименты не позволяют выделить и оценить степень влияния какого-либо отдельного параметра или характеристики объекта исследования на значения ПКЭ, так как на практике часто невозможно не только зафиксировать все, кроме исследуемого параметры и характеристики режима работы системы тягового электроснабжения, но даже и повторить эксперимент при одних и тех же условиях.

Поэтому наиболее рациональным способом исследования режимов работы системы тягового электроснабжения при отсутствии возможности проведения многократных экспериментов является имитационное моделирование, которое характеризуется высокой степенью детализации, возможностью исследования динамики развития процессов и достоверностью получаемых результатов.

В системе тягового электроснабжения переменного тока для повышения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) включают установки поперечной емкостной компенсации (КУ) на тяговых подстанциях и (или) на постах секционирования (ПС), а установки продольной емкостной компенсации (УПК) включают на тяговых подстанциях (ТП).

Для выбора параметров КУ и УПК выполняют расчет минимального напряжения на токоприемнике и максимальной нагрузки подстанции, а затем проводят расчет номинальной мощности КУ с определением номинального тока и номинального сопротивления УПК.

Расчет минимального напряжения на токоприемнике ЭПС и максимальных нагрузок подстанции для заданных размеров движения в нормальном и вынужденном режимах выполняют с использованием программного комплекса «КОРТЭС» (ВНИИЖТ). В условиях эксплуатации на действующих участках названные параметры уточняются путем измерений.

Расчеты принято выполнять в следующей последовательности:

определяется и сопоставляется с нормативными значениями [2] минимальное напряжение на токоприемнике ЭПС в нормальном режиме работы системы тягового электроснабжения;

если напряжение на токоприемнике превышает минимально допустимое напряжение, то КУ и УПК не устанавливаются и на этом этапе расчет заканчивается.

Если для выполнения нормативов требуется повышение напряжения на токоприемнике, то выполняется два варианта расчета:

первый вариант – с помощью установки КУ, при этом необходимо рассчитать их мощность и определить места их размещения;

второй вариант – с помощью включения УПК на ТП, при этом необходимо для устанавливаемого устройства рассчитать номинальные значения его тока и сопротивления;

далее по проведенным расчетам выбирается вариант с наименьшими капитальными затратами.

По существующему методу проведен расчет параметров и выполнен выбор мест размещения КУ и УПК для заданных размеров движения (таблица) объекта исследования реального участка Теба – Ташеба Абаканской дистанции электроснабжения Красноярской железной дороги со сложным профилем пути. По результатам расчета принято решение об установке КУ номинальной мощностью 3 Мвар на ПС межподстанционной зоны Югачи – Бискамжа.

Размеры движения по участку Теба – Ташеба

Вид движения	Четное и нечетное направление		
	поездов в сутки	масса, т	коэффициент съема
Пассажирское	10	–	2,00
Пригородное	10	–	2,00
Грузовое: наибольшой массы	30	6000	–
средней массы	20	4000	–
Всего: груз. + пасс.	50 + 20	–	–

Существующий метод расчета параметров и выбора мест размещения устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности имеет существенные недостатки:

– не учитывается качество электрической энергии на тяговых подстанциях исследуемого (расчетного) участка;

– не контролируется величина уравнительного тока в тяговой сети;

– не учитывается влияние рекуперативного торможения ЭПС;

– не исследуется величина потерь мощности в системе тягового электроснабжения;

– отсутствует возможность одновременной установки УПК на ТП и КУ на посту секционирования.

Для осуществления более эффективного расчета параметров и выбора мест размещения устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности необходимо учитывать ПКЭ на ТП исследуемого участка, УТ в тяговой сети, рекуперативное торможение ЭПС и потери мощности в системе тягового электроснабжения.

Устройства компенсации реактивной мощности, устанавливаемые в различных ветвях и узлах системы тягового электроснабжения, при правильном расположении и выборе соответствующих мощностей решают задачи снижения потерь электрической энергии в системе как внешнего, так и тягового электроснабжения. При определенных значениях мощности установок уменьшается несимметрия тяговой нагрузки.

В свою очередь использование продольной емкостной компенсации в фазе питающего фидера контактной сети повышает напряжение на токоприемниках электровозов. В то же время падение напряжения на УПК приводит к изменению напряжения на смежном тяговом плече подстанции, а наличие рекуперативного торможения в межподстанционной зоне усложняет общую картину. Анализ возможного эффекта позволит избежать необоснованных затрат и добиться улучшения уровня напряжения. Анализ режимных последствий применения устройств компенсации необходимо проводить с учетом реакции системы внешнего электроснабжения, поскольку ее реактансы играют существенную роль. В связи с этим важное практическое значение представляет рассмотрение следующих вопросов:

исследование влияния места расположения и мощности устройств компенсации на потери мощности в системе тягового электроснабжения;

влияние мощности устройств компенсации на величину уравнительных токов в тяговой сети при различных вариантах установки;

оценка качества электрической энергии на исследуемом участке при изменении мощности КУ и места его установки;

оценка увеличения напряжения на токоприемниках поездов за счет применения устройств компенсации;

оценка эффекта КУ по стабилизации напряжения на шинах тяговой подстанции.

В качестве рабочего инструмента для анализа указанных выше эффектов использован программный комплекс имитационного моделирования Fazonord.

Анализ эффекта влияния устройств компенсации выполнен применительно к реальному участку Теба – Ташеба Абаканской дистанции электроснабжения Красноярской железной дороги (рисунок 1).

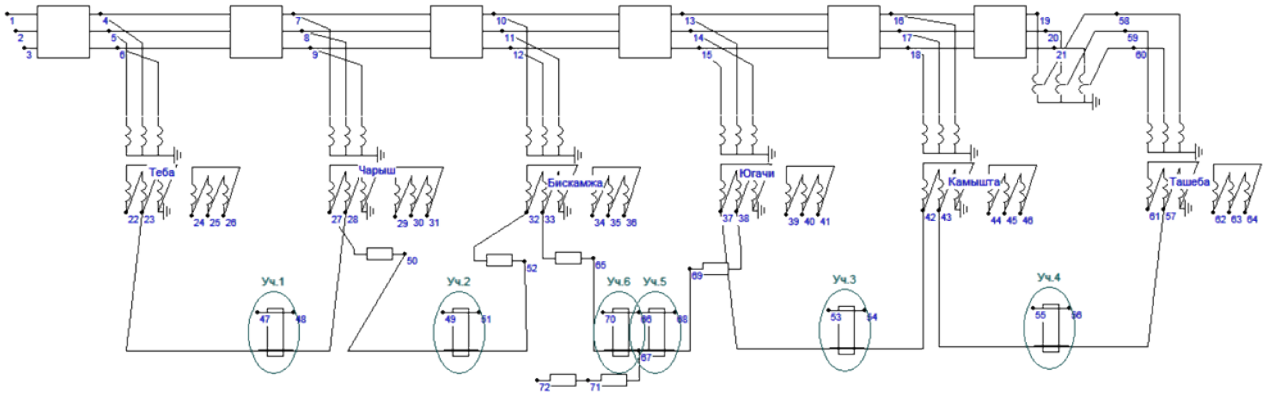


Рисунок 1 – Модель электроэнергетической системы в программном комплексе Fazonord

В результате имитационного моделирования получено, что при установке КУ на ПС с увеличением мощности КУ повышаются потери мощности в системе тягового электроснабжения, в то же время при установке КУ на тяговых подстанциях потери мощности в системе тягового элек-

троснабжения незначительны. Как видно из рисунка 2, УТ не зависит от мощности КУ при расположении его на ПС. При установке КУ на тяговых подстанциях с увеличением его мощности возрастает УТ в МПЗ.

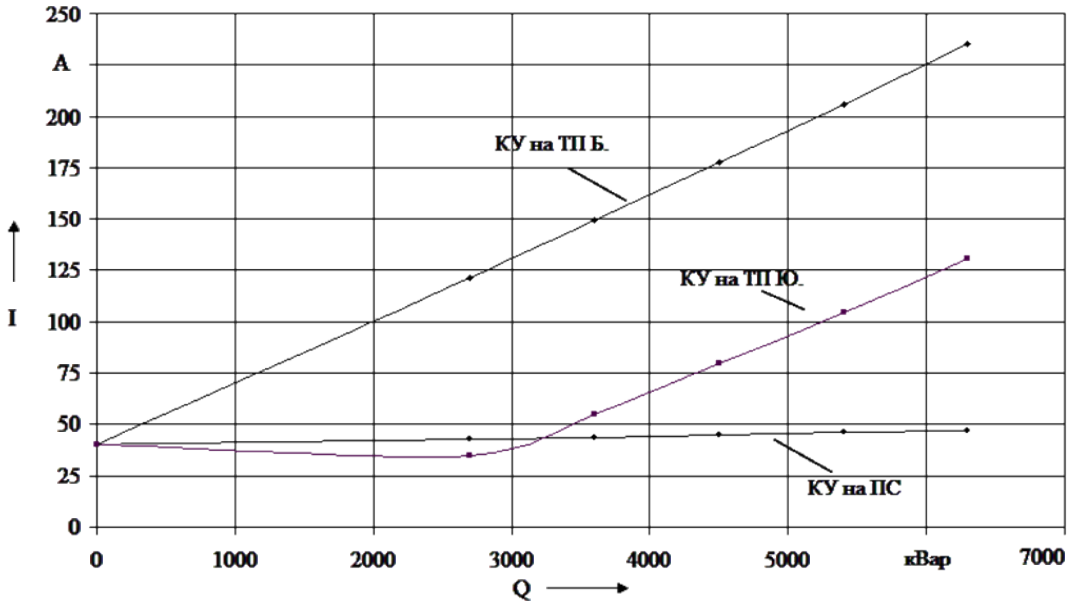


Рисунок 2 – Зависимость УТ от мощности КУ при наличии УПК в фазах на тяговых подстанциях Югачи и Бискамжа и КУ на ТП Бискамжа, ТП Югачи, посту секционирования

Наличие УПК на тяговых подстанциях существенно не влияет на коэффициент искажения синусоидальности питающего напряжения на фидерах контактной сети (ФКС). При установке или отсутствии УПК в фазу на ТП Югачи и Бискамжа и установке КУ на ТП Бискамжа мощность КУ не влияет на коэффициент искажения синусоидальности питающего напряжения на шинах ТП. В остальных случаях (при установке КУ на ПС или на ТП Югачи) при увеличении мощности КУ происходит снижение коэффициента искажения синусоидальности питающего напряжения на ФКС (рисунок 3).

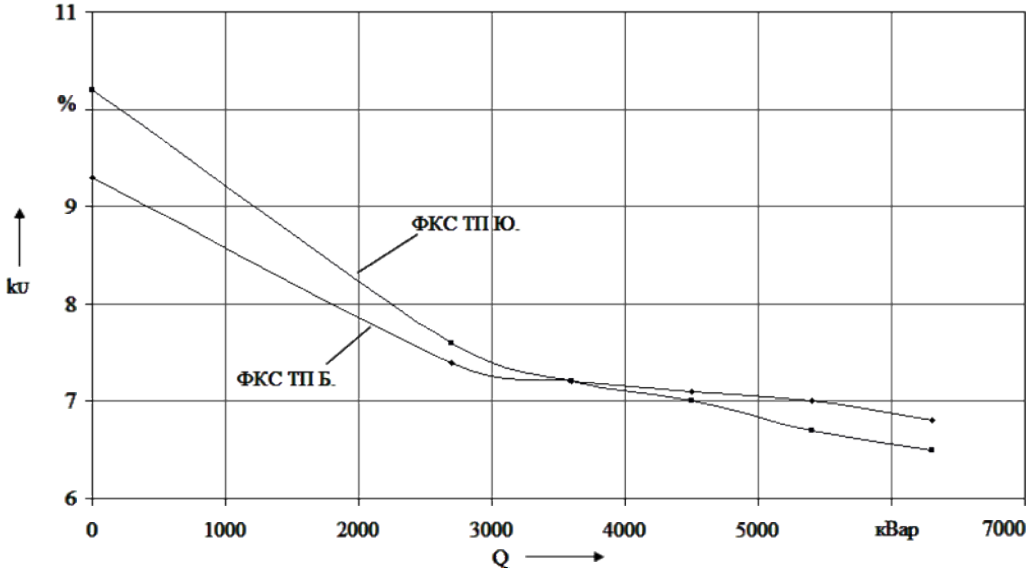


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента искажения синусоидальности питающего напряжения на ФКС от мощности КУ (при наличии УПК в фазах на ТП Югачи и Бискамжа и КУ на ПС) при пропуске пакета поездов по участку Югачи – Бискамжа

При увеличении мощности КУ, независимо от места его расположения, увеличивается минимальное напряжение на токоприемнике ЭПС (рисунок 4), причем наибольшее увеличе-

ние минимального напряжения на токоприемнике ЭПС наблюдается при установке КУ на ПС, чем при установке КУ на тяговых подстанциях.

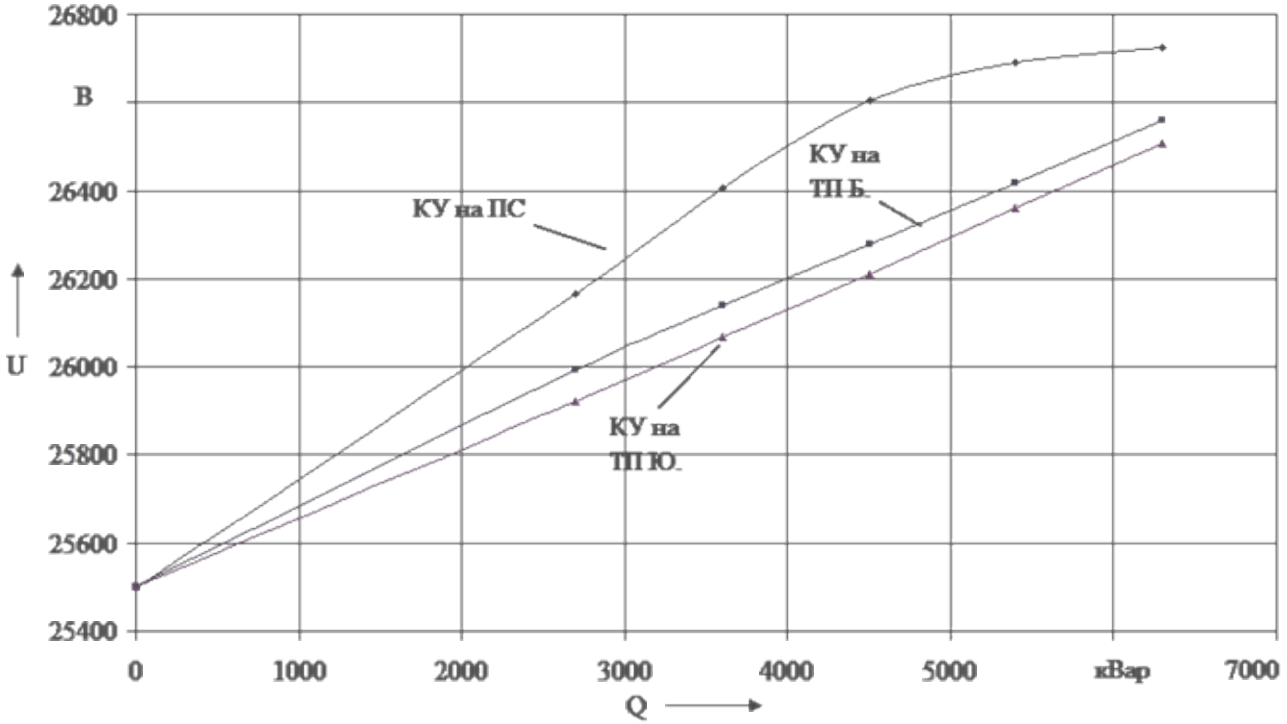


Рисунок 4 – Зависимость минимального напряжения на токоприемнике ЭПС от мощности КУ при наличии УПК в фазах на ТП Югачи и Бискамжа и КУ на ТП Бискамжа, ТП Югачи, посту секционирования при пропуске пакета поездов по участку Югачи – Бискамжа

По результатам имитационного моделирования для обеспечения минимально допустимого напряжения на токоприемнике ЭПС принято решение об установке УПК в фазах на тяговых подстанциях Бискамжа и Югачи и КУ мощностью 3 Мвар на ПС. Расчетные значения исследуемых параметров для этого варианта составляли:

уравнительного тока: $I_у = 54{,}2$ А,

потерь мощности в системе тягового электроснабжения: $\Delta W_{акт} = 437{,}5$ кВт·ч., $\Delta W_{реакт} = 548{,}4$ квар·ч.,

коэффициента искажения синусоидальности питающего напряжения на ФКС ТП Бискамжа: $Ku_{Б.} = 7{,}4$ %, ТП Югачи $Ku_{Ю.} = 7{,}6$ %;

минимального напряжения на токоприемнике ЭПС: $U_{min} = 26189$ В.

Таким образом, выбор места установки КУ (тип КУ, место установки КУ, параметры КУ) следует осуществлять с учетом всех влияющий факторов (уровень напряжения на токоприемнике ЭПС, капитальные затраты на установку КУ, ПКЭ на ТП, УТ в КС, рекуперативное торможение ЭПС, потери мощности в системе ЭЛС).

Список литературы

1. Привалов, С. Я. Анализ влияния тяговой нагрузки на показатели качества электрической энергии системы внешнего электроснабжения и районных потребителей. [Текст] // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта: Сб. науч. статей молодых ученых и аспирантов университета / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2009. – №10. – С. 29 – 33.

2. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. ЦЭ-462. МПС. М, 1997. – С. 78.

УДК 620.97

А. М. Парамонов, Е. М. Резанов, А. В. Кушнаренко

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Предложена методика определения оптимальной температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива в термических печах с радиационными трубами. Разработан алгоритм, для ее определения, исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на рекуператор и топливо.

Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма для определения экономически наивыгоднейшей температуры подогрева воздуха в рекуператоре, идущего на горение топлива, при проектировании и эксплуатации термических печей с радиационными трубами. Использование данных разработок позволяет повысить тепловую эффективность и экономичность их работы.

Эффективность использования топлива в термических печах повышается при сочетании мероприятий по обеспечению полного его сгорания при минимальном избытке воздуха с утилизацией теплоты уходящих газов. Высокотемпературный подогрев воздуха в рекуператоре печи – основное мероприятие по повышению тепловой эффективности печей, позволяющее повысить их термический КПД, снизить удельный расход топлива с одновременным увеличением удельной производительности печи. Однако это ведет к увеличению затрат на теплоутилизирующие устройства, поэтому целесообразно получить оптимальную температуру подогрева воздуха, идущего для горения топлива в термических печах с радиационными трубами.

Сравнительная эффективность инноваций, согласно положениям методики определения экономической эффективности капитальных вложений, служит в системе технико-экономических расчетов в качестве основной их количественной оценки при выборе оптимального варианта, характеризуемого наименьшими затратами общественного труда, которые определяются выражением [1]:

$$З = C + P_н \cdot K, \tag{1}$$

где C – изменяющиеся годовые эксплуатационные расходы, р./год; $P_н$ – норма дисконта инвестиций, 1/год; K – единовременные капитальные вложения, р.

Эксплуатационные расходы при нагреве металла складываются из двух групп затрат: энергетических, связанных с использованием топлива, и неэнергетических состоящих из прочих видов затрат, связанных с осуществлением технологического процесса нагрева [2].

Группа неэнергетических затрат включает в себя затраты на подачу дутьевого воздуха для горения топлива и на отвод дымовых газов за пределы производственных зданий; на подачу и отвод охлаждающей воды, обеспечивающей надежность работы элементов нагревательной печи; на заработную плату производственного персонала; на текущий ремонт печного оборудования; на амортизационные отчисления; на обеспечение нормальных санитарно-гигиенических условий труда.

Из всех текущих расходов при определении оптимальной температуры подогрева воздуха для горения топлива переменной величиной являются затраты на топливо, на подачу дутьевого воздуха и на отвод дымовых газов за пределы печи. Величины отчислений на реновацию, капитальный и текущий ремонт принимаются пропорциональными капитальным вложениям.

Выражение для определения величины суммарных дисконтированных затрат по рекуператору и расходу топлива примет вид:

$$З_р = (S_т + S_{ам} + S_в) + P_н \cdot K, \tag{2}$$

$$S_т = C_т \cdot B, \tag{3}$$

$$S_{ам} = П \cdot К, \quad (4)$$

$$S_в = C_э \cdot h \cdot \Delta N_{т.\,д.} \cdot H_р, \quad (5)$$

$$К = P_р \cdot H_р + C_{т.\,д.} \cdot Z \cdot \Delta N_{т.\,д.} \cdot H_р, \quad (6)$$

$$C_т = P_т \cdot h, \quad (7)$$

где $S_т$ – годовые затраты на топливо, р./год; $S_{ам}$ – годовые отчисления на амортизацию, р./год; $S_в$ – годовые затраты на подачу дутьевого воздуха для горения топлива и отвод дымовых газов за пределы печного агрегата, р./год; $C_т$ – годовая стоимость топлива, $\frac{р.}{м^3} \cdot \frac{с}{год}$; B – расход топлива, м^3/с; $П$ – норма амортизационных отчислений, 1/год; $C_э$ – стоимость электроэнергии, р./(Вт·с); h – время работы печи в течение года, с/год; $\Delta N_{т.д}$ – мощность, затрачиваемая на обслуживание 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора (на преодоление газового и воздушного сопротивления), Вт/м^2; $H_р$ – поверхность нагрева рекуператора, м^2; $P_р$ – капиталовложения в сооружение 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора, р./м^2; $C_{т.д.}$ – стоимость тягодутьевых машин, р./Вт; Z – коэффициент запаса, включающий в себя резерв по расходу и давлению тягодутьевых машин и мощности электродвигателя; $P_т$ – полная расчетная стоимость 1 м^3 натурального топлива, р./м^3.

Подставив выражения (3) – (6) в уравнение (2), получим:

$$З_р = C_т \cdot B + C_р \cdot H_р, \quad (8)$$

где $C_р$ – годовая стоимость 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора, р./(м^2·год),

$$C_р = P_р \cdot (P_н + П) + \Delta N_{т.д.} \cdot [Z \cdot C_{т.д.} \cdot (P_н + П) + C_э \cdot h]. \quad (9)$$

Значение оптимальной температуры подогрева воздуха для конкретной температуры уходящих газов на выходе из радиационной трубы печи можно найти исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на рекуператор и топливо $З_р$, при приравнивании к нулю частных производных функции по оптимизируемому параметру [3]:

$$\frac{\partial З_р}{\partial t_в^{//}} = C_т \frac{\partial B}{\partial t_в^{//}} + C_р \frac{\partial H_р}{\partial t_в^{//}} = 0, \quad (10)$$

где $t_в^{//}$ – температура воздуха на выходе из рекуператора, ºС.

Выражение для расхода топлива получим из уравнения теплового баланса печи [4]:

$$Q_х + Q_в + Q_т + Q_{экз} = Q_м + Q_{ух} + Q_{х.г.} + Q_{м.г.} + Q_{кл} + Q_{тр} + Q_{ат} + Q_{охл} + Q_{изл} + Q_{ак}, \quad (11)$$

$$Q_х = B \cdot Q_н^р; \quad (12);$$

$$Q_в = B \cdot C_в^* \cdot t_в^* \cdot V_в; \quad (13)$$

$$Q_т = B \cdot C_т^/ \cdot t_т^/; \quad (14)$$

$$Q_{ух} = B \cdot C_г \cdot t_г \cdot V_г; \quad (15);$$

$$Q_{х.г.} = B \cdot V_г \cdot R; \quad 16);$$

$$Q_{м.г.} = B \cdot Q_н^р \cdot R_2. \quad 17)$$

где $Q_х$ – химическая теплота топлива, Вт; $Q_в$ и $Q_т$ – теплота, вносимая подогретым воздухом и с подогретым топливом, Вт; $Q_{экз}$ – теплота экзотермических реакций, Вт; $Q_м$ – теплота, необходимая для нагрева металла, Вт; $Q_{ух}$ и $Q_{х.г}$ – потери теплоты с уходящими продуктами сгорания топлива и от химической неполноты сгорания топлива, Вт; $Q_{м.г.}$ и $Q_{кл}$ – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива и теплопроводностью через кладку печи,

Вт; $Q_{изл}$ и $Q_{тр}$ – потери теплоты излучением через открытые окна и щели и расходуемой на нагрев транспортных средств и тарных устройств, Вт; $Q_{ат}$ и $Q_{охл}$ – потери теплоты с защитной атмосферой, покидающей рабочее пространство печи и водоохлаждаемыми элементами, Вт; $Q_{ак}$ – потери теплоты на аккумуляцию кладкой при выводе нагревательной печи из холодного состояния после длительного простоя на стационарный температурный режим, Вт; $Q_н^р$ – низшая теплота сгорания топлива, Дж/м^3; $C_в^*$, $t_в^*$ –средняя объемная теплоемкость и температура подогретого воздуха, поступающего к горелочным устройствам печи, Дж/(м^3·К), °C; $V_в$ – количество воздуха, необходимое для сжигания единицы количества топлива, м^3/м^3; $C_т^/$, $t_т^/$ –средняя объемная теплоемкость и температура топлива, Дж/(м^3·К), °C; $t_г$, $C_г$ – температура и средняя объемная теплоемкость уходящих из радиационных труб печного агрегата газов, °C, Дж/(м^3·К); $V_г$ – количество дымовых газов на единицу количества топлива, м^3/м^3; R – теплота несгоревшего CO в уходящих газах, Дж/м^3; R_2 – доля потерь от механической неполноты сгорания.

Подставив выражения (12) – (17) в уравнение (11), получим:

$$B \cdot Q_н^р + B \cdot C_в^* \cdot t_в^* \cdot V_в + B \cdot C_т^/ \cdot t_т^/ + Q_{экз} =$$
$$= Q_м + B \cdot C_г \cdot t_г \cdot V_г + B \cdot V_г \cdot R + B \cdot Q_н^р \cdot R_2 + Q_{кл} + Q_{тр} + Q_{ат} + Q_{охл} + Q_{изл} + Q_{ак}. \quad (18)$$

Температура воздуха $t_в^*$, поступающего к горелочным устройствам печи, связана с температурой воздуха на выходе из рекуператора, равенством:

$$V_в \cdot C_в^* \cdot t_в^* = V_в \cdot C_в^{//} \cdot t_в^{//} - V_в \cdot C_в^{//} \cdot \delta t_в, \quad (19)$$

где $\delta t_в$ – падение температуры воздуха на пути от рекуператора до горелочных устройств печи вследствие потерь теплоты в окружающую среду, °C; $C_в^{//}$, $t_в^{//}$ – средняя объемная теплоемкость и температура воздуха на выходе из рекуператора, Дж/(м^3·К).

Подставив формулу (19) в уравнение (18), получим выражение для определения расхода топлива на печной агрегат с радиационными трубами:

$$B = \frac{Д}{\left(E + C_в^{//} \cdot V_в \cdot t_в^{//}\right)}, \quad (20)$$

где
$$E = Q_н^р \cdot (1 - R_2) + C_т^/ \cdot t_т^/ - C_г \cdot t_г \cdot V_г - V_г \cdot R - V_в \cdot C_в^{//} \cdot \delta t_в; \quad \ldots \quad (21)$$

$$Д = Q_м + Q_{кл} + Q_{тр} + Q_{ат} + Q_{охл} + Q_{изл} + Q_{ак} - Q_{экз}. \quad (22)$$

С учетом условия установки рекуператора на каждой радиационной трубе печного агрегата выражение для определения расхода топлива на одну радиационную трубу примет вид:

$$B = \frac{Д}{n_т\left(E + C_в^{//} \cdot V_в \cdot t_в^{//}\right)}, \quad (23)$$

где $n_т$ – число радиационных труб в печи, шт.

Величина поверхности нагрева $H_р$ рекуператора определяется из выражения [5]:

$$H_р = \frac{B \cdot \eta_в \cdot V_в (C_в^{//} \cdot t_в^{//} - C_в^/ \cdot t_в^/)}{K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot \upsilon}, \quad (24)$$

где $\eta_в$ – коэффициент, учитывающий потери воздуха в рекуператоре; $C_в^/$, $t_в^/$ – средняя объемная теплоемкость и температура воздуха на входе в рекуператор, Дж/(м^3·К); K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·К); $\varepsilon_{\Delta t}$ – поправочный коэффициент при сложной схеме теплообмена; υ – средний температурный напор, °C.

Средний температурный напор υ в рекуператоре определяется по приближенной формуле [6]:

$$\upsilon = А\,(t_г^{//} - t_в^/) + Б\,(t_г^/ - t_в^{//}), \quad (25)$$

где $t_г^{/}$, $t_г^{//}$ – температура газов на входе и выходе из рекуператора, °*С*; *А* и *Б* – коэффициенты, зависимые от соотношения $(t_г^{//} - t_в^{/})/(t_г^{/} - t_в^{//})$, и эти коэффициенты имеют численные значения.

В зависимости от соотношения $(t_г^{//} - t_в^{/})/(t_г^{/} - t_в^{//})$ коэффициенты *А* и *Б* принимают следующие численные значения:

при $(t_г^{//} - t_в^{/})/(t_г^{/} - t_в^{//}) = 1 \div 3$ $A = 0{,}43$, $Б = 0{,}57$;

при $(t_г^{//} - t_в^{/})/(t_г^{/} - t_в^{//}) = 3 \div 6$ $A = 0{,}35$, $Б = 0{,}735$.

Принятое допущение дает отклонение от среднелогарифмического значения величины υ не более чем на 2 %.

Температура газов на входе в рекуператор $t_г^{/}$ определяется из выражения [7, с. 94]:

$$t_г^{/} = \frac{C_г \cdot t_г + \Theta \cdot C_в^{/} \cdot t_в^{/}}{C_г^{/}\left(1+\Theta\right)} - \delta t_г\,, \tag{26}$$

где $\delta t_г$ – падение температуры газов на пути до рекуператора вследствие потерь тепла в окружающую среду, °*С*; Θ – коэффициент, учитывающий разбавление уходящих газов воздухом на пути до рекуператора.

Температура уходящих газов на выходе из рекуператора $t_г^{//}$ определяется из уравнения теплового баланса [7, с. 96]:

$$t_г^{//} = \frac{C_г^{/}}{C_г^{//}} t_г^{/} - \frac{V_в \cdot \eta_в \left(C_в^{//} \cdot t_в^{//} - C_в^{/} \cdot t_в^{/}\right)}{m \cdot V_г \cdot \eta_г \cdot C_г^{//}\left(1+\Theta\right)}\,, \tag{27}$$

где $C_г^{/}$, $C_г^{//}$ – средняя объемная теплоемкость газов на входе и выходе из рекуператора, Дж/(м^3·К); *m* – коэффициент, учитывающий выбивание продуктов сгорания из радиационной трубы; $\eta_г$ – коэффициент, учитывающий тепловые потери через ограждающие стенки рекуператора в окружающею среду.

Подставив выражение (27) в уравнение (25), получим:

$$\upsilon = U - W \cdot t_в^{//}, \tag{28}$$

где

$$U = (A\frac{C_г^{/}}{C_г^{//}} + Б)t_г^{/} + (\frac{V_в \cdot \eta_в \cdot C_в^{/}}{m \cdot V_г \cdot \eta_г \cdot C_г^{//} \cdot (1+\Theta)} - 1)A \cdot t_в^{/}; \tag{29}$$

$$W = \frac{A \cdot V_в \cdot \eta_в \cdot C_в^{//}}{m \cdot V_г \cdot \eta_г \cdot C_г^{//}(1+\Theta)} + Б\,. \tag{30}$$

Подставив выражения для расчета *B* (23) и υ (28) в уравнение (24), получим искомую зависимость $H_р = f(t_в^{//})$ в виде:

$$H_р = \frac{Д \cdot \eta_в \cdot V_в (C_в^{//} \cdot t_в^{//} - C_в^{/} \cdot t_в^{/})}{n_т (E + V_в \cdot C_в^{//} \cdot t_в^{//}) \cdot K \cdot \varepsilon_{\Delta t} (U - W \cdot t_в^{//})}\,. \tag{31}$$

Взяв первые производные по $t_в^{//}$ из выражений для определения расхода топлива (23) и поверхности нагрева рекуператора (31), получим:

$$\frac{\partial B}{\partial t_в^{//}} = -\frac{Д \cdot C_в^{//} \cdot V_в}{n_т (E + C_в^{//} \cdot V_в \cdot t_в^{//})^2}\,, \tag{32}$$

$$\frac{\partial H_р}{\partial t_в^{//}} = \frac{Д \cdot \eta_в \cdot V_в \left[N + L\right]}{n_т \cdot K \cdot \varepsilon_{\Delta t} (E + C_в^{//} \cdot V_в \cdot t_в^{//})^2 (U - W \cdot t_в^{//})^2}\,, \tag{33}$$

где $$N = C_{в}^{//2} \cdot V_{в} \cdot W \cdot t_{в}^{//2} - 2C_{в}^{/} \cdot t_{в}^{/} \cdot C_{в}^{//} \cdot V_{в} \cdot W \cdot t_{в}^{//};, \quad (34)$$

$$L = C_{в}^{//} \cdot E \cdot U + C_{в}^{/} \cdot t_{в}^{/} \left(C_{в}^{//} \cdot V_{в} \cdot U - W \cdot E \right). \quad (35)$$

Подстановка выражений (32) и (33) в уравнение (10) позволяет получить уравнение для определения значения оптимальной температуры подогрева воздуха $t^{//}_{вопт}$, подаваемого на горение топлива:

$$a \cdot t_{в}^{//2} + b \cdot t_{в}^{//} + d = 0, \quad (36)$$

$$t_{вопт}^{//} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot d}}{2 \cdot a}, \quad (37)$$

где $$a = C_{р} \cdot \eta_{в} \cdot C_{в}^{//2} \cdot V_{в} \cdot W - K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot C_{в}^{//} \cdot C_{т} \cdot W^2; \quad (38)$$

$$b = 2(K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot C_{т} \cdot U - C_{р} \cdot \eta_{в} \cdot C_{в}^{/} \cdot t_{в}^{/} \cdot V_{в}) C_{в}^{//} \cdot W; \quad (39)$$

$$d = C_{р} \cdot \eta_{в} \left[C_{в}^{//} \cdot E \cdot U + C_{в}^{/} \cdot t_{в}^{/} (C_{в}^{//} \cdot V_{в} \cdot U - W \cdot E) \right] - \\ - K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot C_{в}^{//} \cdot C_{т} \cdot U^2. \quad (40)$$

В качестве расчетного принимается выражение:

$$t_{вопт}^{//} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot d}}{2 \cdot a}, \quad (41)$$

поскольку значения величины оптимальной температуры подогрева воздуха $t^{//}_{вопт}$, вычисленные по выражению

$$t_{вопт}^{//} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot d}}{2 \cdot a}, \quad (42)$$

как показали проведенные расчеты, всегда отрицательные, что не имеет физического смысла.

На основании полученной матеиатической модели выражений разработан алгоритм определения оптимальной температуры подогрева воздуха на выходе из рекуператора для конкретной температуры уходящих газов, на выходе из радиационной трубы печного агрегата.

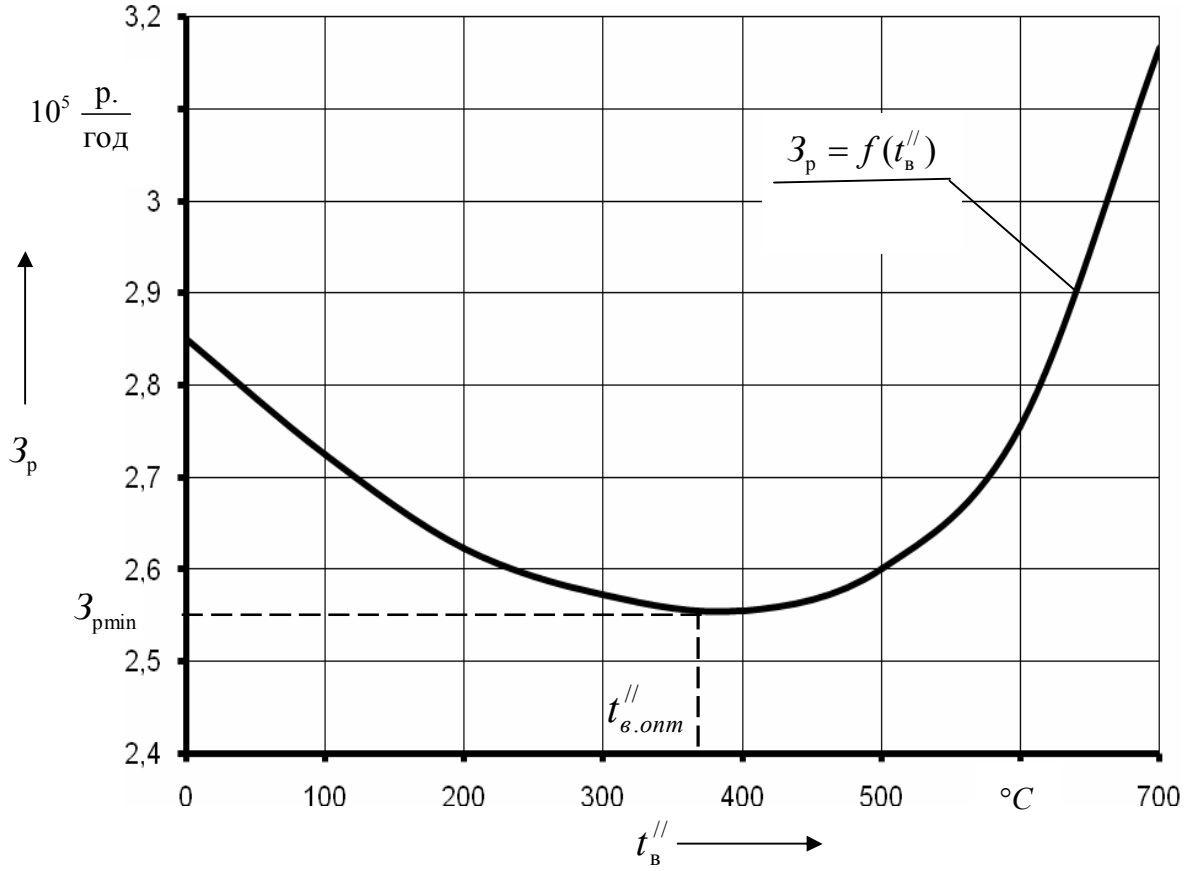
Проведенные расчетные исследования показали, что значение оптимальной температуры подогрева воздуха $t^{//}_{вопт}$, определенное по выражению (41), отвечает минимуму целевой функции (рисунок).

Повышение температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива в радиационной трубе термической печи, приводит к возрастанию температуры горения топлива и, как следствие, к повышению температуры стенки трубы. Для жаростойких радиационных труб, выполненных из легированных сталей, допустимая температура стенки 1050 – 1150 °*C*, для карбидокремниевых – 1250 – 1350 °*C*.

При определении оптимальной температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива в радиационных трубах термических печей, необходимо вводить ограничение, выраженное неравенством:

$$t_{ст} \le t_{ст}^{доп}, \quad (43)$$

где $t_{ст}^{доп}$ – допустимая температура стенки радиационной трубы °*C*; $t_{ст}$ – температура стенки на начальном участке радиационной трубы при подогреве воздуха, идущего для горения топлива, °*C*.



Зависимость дисконтированных затрат по рекуператору и топливу
от температуры подогрева воздуха

Выражение для теплового потока, воспринятого внутренней стенкой радиационной трубы, имеет вид [8]:

$$Q_{ст} = Q_{г.ст}^{л} + Q_{г.ст}^{к}, \tag{44}$$

где $Q_{г.ст}^{л}$ – тепловой поток, переданный газом стенке излучением, Вт; $Q_{г.ст}^{к}$ – тепловой поток, переданный газом стенке конвекцией, Вт.

Тепловой поток, переданный газом стенке радиационной трубы излучением, вычисляется по выражению [4, 8], Вт:

$$Q_{г.ст}^{л} = C_0 \cdot \varepsilon_{пр} \cdot F_{ст}^{вн} \left[\varepsilon_г \left(\frac{T_т}{100} \right)^4 - \alpha_г \left(\frac{T_{ст1}}{100} \right)^4 \right], \tag{45}$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м^2·К^4); $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты стенки; $\varepsilon_г$ – степень черноты излучаемого газа; $\alpha_г$ – поглощательная способность газа при температуре стенки радиационной трубы; $T_т$ – теоретическая температура горения топлива в радиационной трубе, *К*; $T_{ст1}$ – температура внутренней поверхности радиационной трубы, *К*; $F_{ст}^{вн}$ – площадь внутренней поверхности радиационной трубы, м^2.

Теоретическую температуру горения топлива можно определить по значению калориметрической температуры горения, вводя поправочный коэффициент [9]:

$$t_{\text{Т}} = \varphi' t_{\text{к}}, \tag{46}$$

где φ' – поправочный коэффициент, принимается в зависимости от калориметрической температуры горения, с учетом влияния эндотермических процессов, снижающих температуру горения вследствие диссоциации продуктов сгорания; $t_{\text{к}}$ – калориметрическая температура горения топлива, *°С*.

В соответствии с рекомендациями [10]

$$t_к = t_к^0 + x_1 \cdot t_в^* + x_2 \cdot t_m^/, \tag{47}$$

где $t_{\text{к}}^0$ – калориметрическая температура горения топлива без подогрева воздуха, определяемая при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \geq 1$; x_1 – коэффициент приращения калориметрической температуры горения при нагреве воздуха на 1 *°С*, *°С*; x_2 – коэффициент приращения калориметрической температуры горения при нагреве топлива на 1°;

Тепловой поток, переданный газом стенке за счет конвекции, составляет 10 ÷ 15 % от $Q_{\text{г.ст}}^{\text{л}}$ [4], поэтому выражение для определения теплового потока, воспринятого внутренней стенкой радиационной трубы, можно записать так:

$$Q_{\text{ст}} = 1{,}15 \cdot C_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot F_{\text{ст}}^{\text{вн}} \left[\varepsilon_{\text{г}} \cdot \left(\frac{T_{\text{т}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст1}}}{100} \right)^4 \right]. \tag{48}$$

Тепловой поток, передаваемый нагреваемому металлу от радиационной трубы, можно определить из выражения [8]:

$$Q_{\text{тр}} = c_{\text{пр}} \cdot \Psi^{\text{общ}} \cdot F_{\text{м}} \left[\left(\frac{T_{\text{ст2}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right], \tag{49}$$

где $c_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м^2·К^4); $\Psi^{\text{общ}}$ – общий угловой коэффициент от радиационной трубы на металл; $F_{\text{м}}$ – поверхность нагреваемого металла, м^2; $T_{\text{ст2}}$ – температура внешней поверхности радиационной трубы, *К*; $T_{\text{м}}$ – температура нагреваемого металла, К.

На начальном участке радиационной трубы можно принять, в первом приближении, следующие допущения: $\alpha_{\text{г}} = 1$ и $T_{\text{ст}} = T_{\text{ст1}} = T_{\text{ст2}}$. В соответствии с принятыми допущениями и рассматриваемым теплообменом в рабочем пространстве печи, обогреваемом радиационными трубами, получим:

$$1{,}15 \cdot C_0 \cdot \varepsilon_{пр} \cdot F_{ст}^{вн} \left[\varepsilon_г \cdot \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right] = c_{пр} \cdot \Psi^{общ} \cdot F_м \left[\left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_м}{100} \right)^4 \right]. \tag{50}$$

Из уравнения (50) получим выражение для определения температуру стенки на начальном участке радиационной трубы:

$$T_{\text{ст}} = 100\sqrt[4]{\frac{1{,}15 \cdot C_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot F_{\text{ст}}^{\text{вн}} \cdot \varepsilon_{\text{г}} \left(\frac{T_{\text{т}}}{100}\right)^4 + c_{\text{пр}} \cdot \Psi^{\text{общ}} \cdot F_{\text{м}} \left(\frac{T_{\text{м}}}{100}\right)^4}{1{,}15 \cdot C_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot F_{\text{ст}}^{\text{вн}} + c_{\text{пр}} \cdot \Psi^{\text{общ}} \cdot F_{\text{м}}}}. \quad (51)$$

Реализация разработанного алгоритма применительно к конкретным условиям эксплуатации печного агрегата с радиационными трубами производительностью 400 кг/ч и температурой нагрева металла 870 °C на одном из предприятий г. Омска, использующих в качестве топлива природный газ с $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ = 34,5 МДж/м^3, $P_{\text{т}}$ = 2,5 р./м^3, h = 4300 ч/год, дала следующие результаты: $t^{//}_{\text{вопт}} = 382\ ^0C$; $З_{\text{pmin}} = 2{,}554 \cdot 10^5$ р./год. Удельный расход топлива на нагрев изделий, подвергаемых термической обработке, уменьшился на 35 %. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 252 тыс. р. в год.

Результаты предложенного алгоритма определения оптимальной температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива в термических печах с радиационными трубами, подтверждают целесообразность его использования при проектировании и эксплуатации термических печей с радиационными трубами.

Список литературы

1. Зайцев, Н. Л. Экономика организации [Текст] / Н. Л. Зайцев. – М.: Экзамен, 2004. – 624 с.

2. Некрасов, А. С. Экономика энергетики процессов нагрева [Текст] / А. С. Некрасов, Ю. В. Синяк. – М. : Энергия, 1975. – 136 с.

3. Батищев, Д. И. Методы оптимального проектирования [Текст] / Д. И. Батищев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.

4. Тымчак, В. М. Расчет нагревательных и термических печей [Текст] / В. М. Тымчак, В. Л. Гусовский. – М. : Металлургия. 1983. – 480 с.

5. Тебеньков, А. М. Рекуператоры для промышленных печей [Текст] / А. М. Тебеньков. – М.: Металлургия, 1975. – 222 с.

6. Бакластов, А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок [Текст] / А. М. Бакластов. – М.: Энергия, 1970. – 568 с.

7. Парамонов, А. М. Повышение тепловой эффективности и экономичности работы нагревательных печей [Текст] / А. М. Парамонов, В. В. Крайнов. – М.: Спутник +, 2006. – 225 с.

8. Еринов, А. Е. Промышленные печи с радиационными трубами [Текст] / А. Е. Еринов, А. М. Семерин. – М.: Металлургия, 1978. – 280 с.

9. Кривандин, В. А. Металлургические печи [Текст] / В. А. Кривандин, Б. Л. Марков. – М.: Металлургия, 1977. – 463 с.

10 Ашуров, С. А. Подсчет температуры горения природного и сжиженного газов [Текст] / С. А. Ашуров. // Газовая промышленность. – 1979. – №1. – С. 3 – 9.

УДК 629.4

Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПАСПОРТЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Статья посвящена вопросам проведения энергетического обследования тяги поездов на железных дорогах России.

Важнейшим инструментом, направленным на оптимизацию энергопотребления в структурных подразделениях железных дорог, является их энергетическое обследование. При его проведении формируются энергетический паспорт железной дороги, содержащий основные характеристики энергопотребления, и программа мероприятий по повышению энергетической эффективности предприятия. Полный энергоаудит на железной дороге невозможен без учета специфики отрасли, где до 80 % потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) приходится на тягу поездов, однако в настоящее время никаких официальных рекомендаций по решению этой проблемы не существует. В связи с этим специалистами кафедры «Прикладная математика и механика» Омского государственного университета путей сообщения предложены методика энергетического обследования тяги поездов, состав и структура «тягового» раздела энергетического паспорта железной дороги (ЭПЖД-Т) и порядок его заполнения.

Разработанный алгоритм проведения энергоаудита тяги поездов является универсальным для структурных подразделений железных дорог с разной спецификой и включает в себя следующие основные этапы:

на подготовительном этапе решаются организационные вопросы, производится ознакомление с участками работы локомотивных бригад и структурой потребления ТЭР на тягу поездов;

непосредственно энергетическое обследование, в ходе которого производится сбор информации о работе локомотивов и потреблении ТЭР на тягу поездов в эксплуатационных локомотивных депо дороги, а также составление карт потребления ТЭР на тягу поездов по сериям локомотивов и видам движения, по непроизводительным затратам энергоресурсов и основным эксплуатационным показателям, оказывающим влияние на тяговое энергопотребление. Пример такой карты приведен в таблице 1, где приняты следующие обозначения: Э – электрическая тяга, Т – тепловозная тяга, ЭП – электровозы постоянного тока, ЭПр – электровозы переменного тока, ТМг – тепловозы магистральные, ТМн – тепловозы маневровые, РА – рельсовый автобус; гр – грузовой, пс – пассажирский, хз – хозяйственный, сб – сборный, мн – маневровый виды движения. На этом этапе производятся также предварительная оценка возможностей экономии ТЭР и выявление объектов, имеющих потенциал для энергосбережения. При этом целесообразно проведение в локомотивных депо контрольных поездок, выполняемых разными видами тягового подвижного состава;

заполнение «тягового» раздела энергетического паспорта, информационной основой для которого являются карты потребления ТЭР;

разработка программы повышения эффективности потребления ТЭР на тягу поездов, включающей в себя набор рекомендаций и план мероприятий по энергосбережению, а также оценку технико-экономического эффекта от их внедрения.

В соответствии с методологией системного подхода объект исследования «энергозатраты на тягу поездов» целесообразно разделить на составляющие по различным группам и признакам, позволяющие упростить их рассмотрение с учетом влияния основных эксплуатационных факторов. Состав раздела ЭПЖД-Т «Показатели эффективности расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов» приведен на рисунке 1. Таблицы данного раздела объединены в четырех группы в соответствии с их функциональным назначением:

ретроспективные ряды фактических показателей работы и энергопотребления эксплуатационных локомотивных депо железной дороги за пять лет. Эти данные служат основой для

проведения анализа выполнения программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности, выработанной при предыдущем энергообследовании, а также для определения тенденций изменения основных показателей потребления ТЭР на тягу поездов;

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

детальные показатели потребления электрической энергии и дизельного топлива на тягу поездов на различных уровнях нормирования, а также значения влияющих факторов.

Таблица 1 – Карта потребления ТЭР на тягу поездов по сериям локомотивов, видам движения и структурным подразделениям

Год	Месяц	Локомотивное депо	Вид тяги	Вид ТПС	Серия локомотива	Вид движения	Общий пробег, км	Работа, 10^4 ткм брутто	Расход ТЭР, тыс. кВт·ч (кг)			
									норма	факт	рекуперация	отопление пассажирских вагонов
2010	1	ТЧ-1	Э	ЭП	ВЛ10	гр	46061	8542	645124	644861	64400	0
2010	1	ТЧ-1	Э	ЭПр	ВЛ80	хз	10748	258	193205	193458	0	0
2010	1	ТЧ-1	Т	ТМг	2ТЭ116	сб	9310	1481	31946	32582	–	0
2010	1	ТЧ-1	Т	ТМн	ТЭМ2	мн	5412	0	345978	346368	–	0
2010	1	ТЧ-1	Т	РА	РА1	хз	621	0	1971	2114	–	0
……												
2010	1	ТЧ-N	Э	ЭП	ЭП2К	пс	20758	2842	228271	228347	34200	15900

Выполненный анализ составляющих энергозатрат на тягу позволил установить основные закономерности их изменения, выявить основные эксплуатационные факторы, влияющие на отдельные составляющие, и определить внутренние взаимосвязи между табличными формами ЭПЖД-Т, схема которых приведена на рисунке 2.

Рисунок 1 – Состав ЭПЖД-Т

Для характеристики общего объема и структуры энергопотребления составляется топливно-энергетический баланс, который формируется на основе данных о потреблении электрической энергии и дизельного топлива различными видами тягового подвижного состава в разных локомотивных депо железной дороги. В отдельных формах энергопаспорта для разных видов тяги приводятся значения эксплуатационных факторов (средней массы грузовых и пассажирских поездов, технической и участковой скоростей движения, непроизводительных потерь и др.), оказывающих непосредственное влияние на величину расхода ТЭР. Исходя из информации об энергопотреблении и работе локомотивов на каждом уровне интеграции данных осуществляется расчет удельного расхода электроэнергии (УРЭ) и дизельного топлива (УРТ).

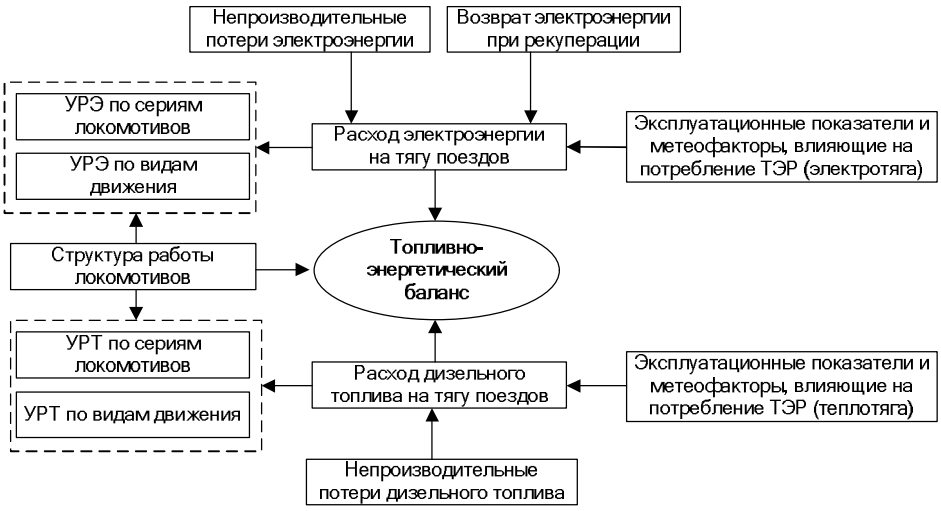


Рисунок 2 – Схема внутренних взаимосвязей форм ЭПЖД-Т

С целью сравнительного анализа энергоемкости различных объектов наблюдения, а также выявления позитивных и негативных факторов, определяющих изменение уровня потребления ТЭР в структурных подразделениях железной дороги, в формах ЭПЖД-Т представлены удельные и относительные показатели структуры грузопотока и энергозатрат по различным категориям, например, по сериям локомотивов и видам движения или по сериям локомотивов и участкам нормирования за отчетный и базисный периоды. В качестве примера в таблице 2 приведен фрагмент такой формы, отражающей соотношения рассматриваемых показателей в структурных подразделениях дороги по сериям электровозов и участкам нормирования.

Таблица 2 – Удельный расход энергии по сериям локомотивов и участкам нормирования в электротяге

Серия локомотива	Участок нормирования	Локомотивное депо	Доля работы категории от работы в целом по дороге	Удельный расход энергии, кВт·ч / 10^4 ткм брутто			
				УРЭ за отчетный период	составляющие УРЭ по дороге	отношение УРЭ по категории к УРЭ по участку нормирования	отношение УРЭ по категории к УРЭ по дороге
ВЛ10	Участок 1 (Н)	1	0,058	67,3	3,9	1,015	0,772
		2	0,020	62,9	1,3	0,949	0,721
		3	0,005	68,5	0,3	1,033	0,786
	По участку 1 (Н)		0,083	66,3	5,5	1,000	0,760
	Участок 1 (Ч)	1	0,029	79,3	2,2	1,003	0,909
		2	0,018	78,7	1,4	0,995	0,903
	По участку 1 (Ч)		0,047	79,1	3,7	1,000	0,907
	……						
	По участку N (Ч)		0,006	84,3	5,1	1,000	0,967
Всего по ВЛ10			0,384	78,1	29,9	–	0,896
……							
Всего по дороге			1,000	87,2	100,0	1,000	1,000
В том числе по участкам нормирования							
Участок 1 (Н)			0,137	79,3	10,7	–	0,909
Участок 1 (Ч)			0,081	78,9	6,4	–	0,905
Участок 2 (Н)			0,052	83,3	4,3	–	0,955
Участок 2 (Ч)			0,076	86,7	6,6	–	0,994
……							
Участок N (Н)			0,001	95,6	0,1	–	1,096
Участок N (Ч)			0,001	91,5	0,1	–	1,049

На основе заполненных форм энергетического паспорта разрабатывается программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности тяги поездов в структурных подразделениях железной дороги. Для ОАО «Российские железные дороги» как организации, осуществляющей регулируемые виды деятельности в сфере железнодорожных перевозок, Федеральной службой по тарифам в качестве основных целевых показателей энергосбережения и повышения энергоэффективности установлены следующие показатели:

энергоемкость производственной деятельности в натуральном исчислении, определяемая как отношение годовых суммарных затрат энергоресурсов на производственную деятельность (A_{md}) к приведенному грузообороту нетто ($(Q_нL)_{md}$):

$$E^{<H>} = \frac{\sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{N} A_{md}}{\sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{N} (Q_нL)_{md}}, \quad (1)$$

где m – счетчик месяцев;

d – счетчик локомотивных депо;

N – количество локомотивных депо на железной дороге;

энергоемкость производственной деятельности в стоимостном исчислении, определяемая как отношение годовых суммарных затрат энергоресурсов на производственную деятельность к величине финансовых доходов железной дороги (P_{md}):

$$E^{<C>} = \frac{\sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{N} A_{md}}{\sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{N} P_{md}}; \quad (2)$$

энергоэффективность производственной деятельности в натуральном и стоимостном исчислении, определяемая как величина, обратная к энергоемкости:

$$Э^{<H>} = \frac{1}{E^{<H>}}; \qquad Э^{<C>} = \frac{1}{E^{<C>}}. \quad (3)$$

В связи с тем, что в основной отчетной форме об энергопотреблении на тягу поездов в локомотивном депо ТХО-1 отсутствуют данные о работе нетто, для расчета энергоемкости тяги поездов в натуральном исчислении целесообразно использовать работу брутто.

Для возможности контроля динамики целевых показателей по каждому направлению анализа энергопотребления на тягу поездов разработана система целевых индикаторов повышения эффективности тяги поездов, пример которой для электрической тяги приведен в таблице 3. С целью повышения энергетической эффективности тяги поездов целесообразно производить ежемесячный мониторинг ее индикаторов. Для достижения целевых индикаторов в первую очередь необходимо использовать основные энергосберегающие технические решения и технологии по тяговой и стационарной энергетике ОАО «РЖД», определенные Энергетической стратегией железных дорог России [1]. Среди них в сфере тяги поездов приведены повышение коэффициентов использования мощности локомотивов, применение энергооптимальных технологий вождения поездов (позволяет снизить энергопотребление на величину до 5 %), систем автоматизированного ведения поезда (возможно снижение до 10 % потребления ТЭР на тягу), исключение из эксплуатации локомотивов с выработанным сроком службы, которые восстанавливать экономически нецелесообразно, исключение грузовых локомотивов из пассажирских перевозок, расширение типажа маневровых локомотивов и др.

Таблица 3 – Система целевых индикаторов повышения энергетической эффективности тяги поездов

Название формы ЭПЖД-Т	Индикатор	Направление изменения
Расход электроэнергии на тягу поездов	Расход электроэнергии	Снижение
Удельный расход энергии по сериям локомотивов и видам движения	Удельный расход электроэнергии по сериям локомотивов и видам движения	Снижение
Возврат электроэнергии при рекуперативном торможении	Удельная рекуперация Доля возврата электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении от величины потребления электроэнергии	Увеличение
Непроизводительные затраты электроэнергии	Количество неграфиковых остановок, выполненных предупреждений об ограничении скорости, неполновесных и неполносоставных поездов; время нагона опоздания пассажирских поездов, горячего простоя; пробег в одиночном следовании	Снижение

Разработанная методика проведения энергообследования тяги поездов апробирована в пяти локомотивных депо трех железных дорог Российской Федерации. При проведении технико-экономического анализа был определен потенциал снижения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов за счет рекомендованных мероприятий, который составил не менее 3 %.

Список литературы

1. Котельников, А. В. Энергетическая стратегия железных дорог России [Текст] / А. В. Котельников // Железные дороги мира. – 2005. – № 2. – С. 16 – 23.

УДК 621.8.035

М. В. Тарута, А. Ю. Финиченко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НУЖД ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В статье рассматриваются вопросы использования теплонасосных установок для обеспечения потребителей тепловой энергией. Приведены наиболее перспективные районы залегания подземных и грунтовых вод на территории России. Перечислены основные преимущества и недостатки, возникающие при эксплуатации тепловых насосов.

Широко известны преимущества использования теплонасосных установок (ТНУ): экологическая чистота, экономичность, повсеместная распространенность и др. Существенного улучшения экономических и экологических характеристик производства теплоэнергии можно достичь с помощью ТНУ, позволяющих переносить низкотемпературную возобновляемую природную энергию и вторичную низкопотенциальную теплоту до более высоких значений температуры, пригодных для теплоснабжения [1 – 3].

Применение ТНУ позволяет также приблизить тепловые мощности к местам потребления, минимизировать протяженность тепловых сетей, рассредоточить выбросы в регионе. Затрачивая на привод компрессора, к примеру, 1 кВт электрической энергии, на выходе теп-

лопроизводительность установки может составить 3 – 6 кВт (тепловой энергии) в зависимости от температуры низкопотенциального источника.

Системы теплоснабжения на основе ТНУ имеют кроме перечисленных выше и еще некоторые преимущества перед другими источниками теплоснабжения:

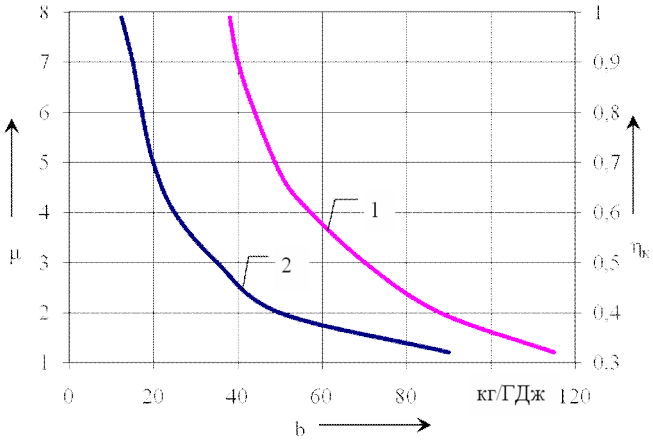
автономность работы – абсолютная независимость работы установки от других источников тепла;

годовой ресурс работы – 8256 ч соответствует нормативам работы теплофикационных установок;

возможность использования низкопотенциальной теплоты возобновляемых источников энергии – тепло грунта, подземных и грунтовых вод, водоемов, низкопотенциальное тепло, сбрасываемое в канализацию, тепло от крупных энергетических теплопроизводителей.

Используя в качестве источника теплоты ТНУ, можно экономить значительное количество энергии, а также органического топлива, цены на которое растут из года в год, и существенно сокращать выбросы вредных веществ, в том числе наиболее опасных NO_x и CO_2. Причем последнее утверждение – значимый показатель при современной экологической ситуации в мире.

Расчетные зависимости изменения удельных показателей энергетической и экологической эффективности теплоисточников малой мощности представлены на рисунке [3].



Графики изменения удельных затрат условного топлива: 1 – котлы и домовые печи, использующие органические виды топлива (уголь, мазут, природный газ);
2 – ТНУ с электроприводом ($\lambda = 0{,}1$; $\eta_{эл}^{ТЭС} = 0{,}37$)

Соответствующие представленным на рисунке зависимостям удельные затраты b условного топлива на единицу отпущенной энергии определяются по формулам [3]:

для топливных котлов (без учета затрат электроэнергии на дутьевые механические устройства топливоподачи и золоудаления) –

$$b_к = \frac{1}{\eta_к \cdot q}; \qquad (1)$$

для ТНУ с электроприводом –

$$b_{т.н.} = \frac{1+\lambda}{\mu \cdot q \cdot \eta_{эл}^{ТЭС}}, \qquad (2)$$

где q – 29,31 МДж/кг – теплота сгорания единицы условного топлива;

$\eta_к$ – КПД котла;

λ – доля технологических потерь электроэнергии при транспортировке от энергоисточника до потребителя;

$\eta_{эл}^{ТЭС}$ – КПД выработки электроэнергии на КЭС.

Безразмерный коэффициент преобразования (коэффициент трансформации тепла)

$$\mu = \frac{Q_{\text{ТНУ}}}{\left(N_{\text{КМ}} + N_{\text{ТР}}\right)}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{ТНУ}}$ – количество теплоты, отпущенной потребителю от ТНУ;

$N_{\text{КМ}} + N_{\text{ТР}}$ – суммарные затраты электроэнергии на привод компрессора и устройств, обеспечивающих транспорт (подачу) низкопотенциального теплоносителя в испаритель ТНУ.

Следует отметить, что по сравнению с котельными, сжигающими природное топливо, парокомпрессионные ТНУ позволяют экономить до 30 % топлива. Это обстоятельство является неоспоримым преимуществом при использовании подобных установок, особенно при современной экологической обстановке в городах. Таким образом, уменьшается загрязнение воздушного бассейна, снижая проблему потепления климата.

Как видно из рисунка, у ТНУ в диапазоне изменения рабочих параметров $3{,}0 < \mu < 5{,}0$ затраты условного топлива существенно меньше, чем у отопительных котлов, благодаря тому, что большая часть теплоты, выработанной ТНУ, составляет трансформированная на более высокий температурный уровень теплота местных нетрадиционных и возобновляемых источников тепла, а также вторичных энергоресурсов (ВЭР).

Однако энергетическая эффективность теплоисточников малой мощности не может служить основным критерием их экологической безопасности.

Для корректного сравнения установок по экологической безопасности следует применять системный подход, учитывающий как используемые виды топлива, так и месторасположение источников, загрязняющих окружающую среду. Необходимо учитывать также высоту дымовых труб и заселенность ближайших территорий, моральный и физический износ промышленных котлов.

В настоящее время тепловые насосы практически не находят применения (или в недостаточном количестве) в такой огромной и «богатой» нетрадиционным источником тепла стране, как Россия.

Использование низкопотенциального тепла ограничено, и в основном это происходит по экономическим причинам. В 60-е – 70-е гг. прошлого столетия структура энергохозяйства крупного предприятия складывалась за счет поддержания в нашей стране низких цен на топливно-энергетические ресурсы, поэтому использование вторичных энергоресурсов низких параметров при такой ситуации экономически не оправдало себя [1].

Сейчас ситуация кардинально изменись и в себестоимость продукции закладывается доля затрат на топливно-энергетические ресурсы, которые резко выросли. Однако на реорганизацию производства руководители идут неохотно, ведь для этого требуется привлечение определенных инвестиций, что связано с нестабильностью экономики, сопряжено с определенными рисками и значительным сроком окупаемости проекта.

Несмотря на большое количество разработок в области использования теплонасосных установок различных видов в системах теплоснабжения они практически не находят применения.

С помощью теплонасосной установки природную теплоту (тепло грунта, водоемов, воздуха, геотермальные воды) и тепловые отходы предприятий можно использовать для различных целей (отопление, горячее водоснабжение, вентиляция) [3 – 5].

Одно из главных направлений использования теплонасосных установок – утилизационные системы горячего водоснабжения [1, 2].

В России существует несколько зон с разведанными запасами грунтовых вод, имеющих различный потенциал, которые можно использовать как на нужды теплоснабжения, так и для выработки электрической энергии (таблица).

Районы с существующими источниками низкопотенциального тепла в России

Район	Глубина залегания, м	Температура воды, ºС	Ожидаемый дебит, л/с	Химическая характеристика воды	Область использования
Камчатка и Курильские острова	100 – 1000	80 – 200	14 – 28	Среднеминеральная хлоридно-натриевая	Электростанции, теплоснабжение
Краснодарский край, Краснодар, Майкоп, Армавир	1000 – 2500	70 – 110	14 – 56	Высокоминерализованная	Теплоснабжение
Европейская часть: Ярославль, Воркута, Оренбург	1000 – 3000	40 – 80	До 28	Высокоминерализованная	Теплоснабжение
Западная Сибирь: Тюмень, Омск, Барабинск	1100 – 3000	70 – 90	14 – 28	Слабоминерализованная, хлор-кальциевая	Теплоснабжение
Северное Забайкалье	~ 2000	40 – 85	14 – 28	Сульфатно-гидрокарбонатно-кальциевая	Теплоснабжение

Из данных таблицы видно, что Россия богата низкопотенциальными источниками тепла, а ТНУ могут найти применение не только на востоке страны, где существуют воды с достаточно высоким потенциалом, но и в Омской области, где воды с температурой до 90 ºС можно использовать для теплоснабжения жителей ближайших сел.

В Омской области, например, в 2005 г. состоялся запуск теплонаносной станции с использованием энергии геотермальных вод. Первая в регионе геотермальная система обеспечивает теплом и водой жителей с. Чистово Оконешниковского района. Причем срок окупаемости составил всего около двух лет, что для теплоэнергетических объектов – незначительный период времени. Богатые запасы термальных вод в Омской области позволяют открыть теплонаносные станции как минимум еще в пяти районах – перспектива перехода на природное отопление может ожидать десятки населенных пунктов юга области. В настоящее время проекты заморожены, очевидно ввиду кризисной ситуации в стране.

Серьезная проблема ограниченности применения ТНУ заключается в том, что сами установки достаточно дороги, за что в конечном итоге платит потребитель. Например, тепловой насос Thermia Diplomat TWS 4RF мощностью 4 кВт стоит 7821 евро, не считая затрат на его монтаж, который может составлять 100 % от стоимости ТНУ, т. е. стоимость подобной установки приближается к стоимости газового котла и подведения газа к индивидуальному строительству. Причем далеко не каждый российский гражданин отдаст предпочтение нетрадиционному и экологически чистому источнику тепла, который имеет более сложный рабочий процесс.

Отсутствие отечественных производителей теплонасосных установок не может не сказаться на их реализации на российском рынке. ЗАО «Энергия» (г. Новосибирск) – практически единственное в России предприятие, серийно выпускающее компрессоры, испарители, конденсаторы и все необходимое оборудование для ТНУ. Эта организация имеет порядка 160 внедренных объектов, например, отопление пос. Велижаны Тюменская области, отопление института экологии в Красноярске и др.

Чаще всего организации предлагают ТНУ не российского производства, а зарубежного, например, немецкого и японского. В Омске, например, компания «Русклимат» предлагает помощь по выбору и осуществляет продажу тепловых насосов Zubudan (Mitsubishi Electric). Определенной поддержки отечественного производителя практически нет и со стороны правительства, как это происходит в Германии, где существуют определенные дотации за каждый киловатт установленной мощности тепловых насосов.

В России работает не более 100 установок общей мощностью около 30 МВт, что составляет примерно 0,1% от общемирового количества устройств. В Сибири и на Алтае установлено более 10 тепловых насосов мощностью от 270 кВт до 3,3 МВт.

Известно, что использование низкокипящего теплоносителя (фреона) пагубно влияет на окружающую среду: фреоны разрушают озоновый слой, который препятствует проникновению к поверхности Земли большого количества ультрафиолета, вызывающего различные онкологические заболевания. Применение некоторых хладонов ограничивается или полностью прекращено. К числу озоноактивных фреонов, применение которых по Монреальскому соглашению сокращается, относятся R11 – R115, но разрабатываются альтернативные заменители рабочих систем, не содержащие активного хлора.

Рабочее вещество ТНУ должно быть химически стабильным по отношению к конструкционным материалам и смазочным маслам и должно иметь высокую критическую температуру. Наиболее приемлемые в системах утилизационного тепло- и хладоснабжения хладоны R142B и R318 [1, 2].

При проектировании ТНУ, следует учитывать тот факт, что по мере эксплуатации самой установки, снижается температура грунта потому, что грунт остывает из-за работы грунтового теплообменника, который и отбирает тепло из недр земли. После пятилетнего использования ТНУ температура грунта нормализуется и принимает постоянное значение, которое с течением времени не меняется. Поэтому рассчитывать ТНУ необходимо на большую мощность, чем требуется для потребителей.

Энергетические кризисы 1973 и 1978 г. стали импульсом для создания тепловых насосов, так как в этот период ученые серьезно задумались о поисках решения проблемы независимости от добываемого нефтяного топлива и цен на него. Мировой экономический кризис 2008 г. должен стать определенным стимулом для человечества по энерго- и ресурсосбережению. Все негативные стороны использования трансформаторов тепла достаточно серьезно осложняют сложившуюся ситуацию на рынке производства тепловой и электрической энергии.

Применение в системах теплоснабжения ТНУ и новых технологий позволит:

1) отказаться от нерационального электрического и в ряде случаев централизованного отопления объектов жилищно-коммунального хозяйства;

2) значительно снизить потребление электроэнергии;

3) обеспечить надежное и экономичное теплоснабжение потребителей;

4) самостоятельно регулировать качество и количество потребляемой теплоты независимо от поставщиков тепловой энергии;

5) отказаться от теплотрасс большой протяженности и, как следствие, сократить значительные потери и затраты на их обслуживание, снизить издержки на выработку тепла и увеличить надежность теплоснабжения.

Применение ТНУ возможно в системе теплоснабжения на сети железных дорог, в частности, в системе отопления промышленных, бытовых и административных зданий. Наиболее выгодно применение тепловых насосов для удаленных от стационарных теплогенерирующих установок (ТЭЦ, котельных) потребителей.

Несомненно то, что в будущем энергосбережение в теплонасосных установках станет очевидным не только для ученым, но и для потребителей тепла, которых необходимо дополнительно стимулировать к внедрению экологически чистых устройств.

Список литературы

1. Назмеев, Ю. Г. Теплоэнергетические системы и энергобалансы промышленных предприятий: учебное пособие для студентов вузов [Текст] / Ю. Г. Назмеев, И. А. Конахина / МЭИ. – М., 2002. – 407 с.

2. Хайнрих, Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения [Текст] / Г. Хайнрих, Х. Найорк, В. Нестлер; Пер. с нем. Н. Л. Кораблевой, Е. Ш. Фельдмана; Под ред. Б. К. Янвеля. – М.: Стройиздат, 1985. – 351 с.

3. Осадчий, Г. Б. Солнечная энергия, ее производные и технологии их использования (Введение в энергетику ВИЭ) [Текст] / Г. Б. Осадчий. – Омск, 2010. – 572 с.

4. Лебедев, В. М. Теплоэнергетика региона [Текст] / В. М. Лебедев. – Омск, 1998. – 102 с.

5. Тепловые электрические станции: учебник для вузов [Текст] / В. Д. Буров, Е. В. Дорохов и др.; под ред. В. М. Лавыгина, А. С. Седлова, С. В. Цанева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2007. – 380 с.

УДК 621.314

Е. А. Третьяков, Н. Н. Малышева, А. В. Краузе

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В настоящее время существуют технические решения и технологии, позволяющие полностью компенсировать как неизменную, так и резкопеременную реактивную составляющую мощности нагрузки. Однако вопрос о выборе типов компенсирующих устройств и их параметров является весьма актуальным. Авторами предлагается подход к выбору компенсирующих устройств, который заключается в том, что компенсацию групповой резкопеременной нагрузки необходимо выполнять не одним компенсатором с высокой удельной стоимостью, а группой таких устройств, причем большая доля реактивной мощности – неизменная составляющая – компенсируется статическими компенсаторами, а переменная составляющая – регулируемыми компенсаторами с учетом технической реализуемости. В данной работе представлен разработанный алгоритм определения оптимального состава и структуры компенсирующих устройств исходя из требуемой компенсации реактивной мощности неизменной и переменной составляющих по критерию минимума затрат.

Повсеместное внедрение силовых установок на базе полупроводниковых элементов, компьютерной техники и цифровых систем управления приводит к ухудшению качества и повышению потерь электрической энергии (ЭЭ) в электрических сетях. Повысить эффективность использования ЭЭ на этапе передачи и потребления можно за счет компенсации реактивной мощности (КРМ) и других искажений в системе электроснабжения.

Приказом Минпромэнерго № 49 от 22 февраля 2007 года введен «Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договоры энергоснабжения)». Данный порядок утверждает предельные значения коэффициента реактивной мощности tgφ для потребителей. Система скидок и надбавок за поддержание требуемого коэффициента реактивной мощности в случае участия потребителя по соглашению с сетевой организацией в регулировании реактивной мощности в часы больших и (или) малых нагрузок электрической сети упразднена и в тарифе не учитывается.

На практике потребитель не имеет материальной заинтересованности в КРМ согласно указанному документу на границе раздела балансовой принадлежности, т.к. снижение потерь при этом произойдет в сетях АО-энерго (энергоснабжающей организации), а не потребителя. Поэтому наиболее оправданной представляется индивидуальная и групповая компенсация реактивной мощности и искажений в сетях потребителя как можно ближе к нагрузке.

При решении указанных задач на первый план выходят проблемы оптимального размещения компенсирующих устройств (КУ) на участке электрической сети 10/0,4 кВ и выбор соответствующих технических средств.

Действующая методика по расчету РМ [1] определяет понятие «экономического» значения РМ, которое необходимо компенсировать с учетом возможностей передачи РМ в сеть низкого напряжения через трансформатор (трансформация в сторону НН). Современные подходы к организации перетоков мощности в электрических сетях базируются на использовании гибких систем передачи для управления потоками мощности и исключении перетоков и трансформации между сетями различных классов напряжений, т. к. это существенно увеличивает потери и перегружает элементы согласования.

Считаем, что использование указанной методики для расчета РМ в нынешних условиях нецелесообразно, т.к. она учитывает интересы энергоснабжающей организации, основана на получении экономического эффекта для народного хозяйства в целом, без учета интересов всех хозяйствующих субъектов, уровня развития современных быстродействующих компенсирующих устройств.

Для повышения качества ЭЭ приоритетной задачей является КРМ по высокочастотным составляющим (колебаниям) графика ударной и резкопеременной нагрузки, которые вызывают колебания, провалы, напряжения, возникновение фликкер-эффекта. Используемые в большинстве случаев ступенчатые или плавно – регулируемые компенсирующие устройства обеспечивают только заданный коэффициент мощности и стабилизацию уровня напряжения в узле подключения при соблюдении баланса реактивной мощности.

Наиболее перспективными в распределительных сетях являются статические тиристорные компенсирующие устройства (СТК) различных типов: реактор с тиристорным управлением и цепью ступенчатого подключения элементов конденсаторной батареи или конденсаторная батарея с тиристорным переключением; кондиционеры гармоник с вольтодобавочным трансформатором, СТАТКОМ (таблица).

Применение нерегулируемых систем компенсации на базе батарей конденсаторов (БСК) без реакторов может приводить к периодическим резонансам на высших частотах и повреждению оборудования. Подобных систем БСК в распределительных сетях 10/0,4 кВ установлено большое количество; они предусматривались проектами 60-х – 70-х гг., практически исчерпали свой ресурс, не обеспечивают уменьшение потерь ЭЭ и не позволяют снижать колебания, провалы напряжений, обусловленные резкопеременной нагрузкой.

Ступенчато регулируемые системы с контакторами являются существенным шагом вперед по экономии затрат на реактивную энергию. Однако недостатком в данном случае будет низкая скорость реакции таких установок (минуты) из-за быстроты протекания процессов в нагрузках, среднесуточный cosφ не превысит 0,92 – 0,94, что может привести к перекомпенсации при настройке на полную компенсацию (рисунок 1).

Тиристорные конденсаторные установки – лучшее решение для осуществления компенсации реактивной мощности нагрузки в короткий период времени. В отличие от установок с контакторами быстродействие тиристорных конденсаторных установкок на несколько порядков выше, т.к. не требуется задержка срабатывания на время разряда конденсатора. В тиристорных установках задержка включения составляет не более 20 мс. При этом следует отметить, что конденсаторы подключаются без пусковых токов. Это продлевает срок службы конденсаторов. В связи с отсутствием движущихся механических контактов тиристорные конденсаторные установки имеют больший ресурс.

Радикальным решением для подавления высокочастотных и низкочастотных помех, компенсации реактивной мощности быстро изменяющейся нагрузки является использование СТАТКОМа (статического синхронного компенсатора), который способен поглощать и возвращать реактивную мощность. Компенсатор выполнен на ячейке автономного инвертора напряжения, управляется в режиме широтно-импульсной модуляции и может работать в режиме активного фильтра. СТАТКОМ в режиме малых нагрузок может поглощать РМ, стабилизируя напряжение.

Технические характеристики КУ

Тип системы	Батареи статических конденсаторов		Статические тиристорные компенсаторы		ДКИН	СТАТКОМ
	нерегулируемые	регулируемые (ступенями)	компенсатор мощности	ФКУ		
Точность регулирования cosφ	от 0,8	0,88 – 0,94	0,944	0,97	0,97	0,97
Быстродействие	нет	5 – 10 мин	0,25 – 0,5 с	20 мс	4 – 20 мс	4 – 20 мс
Симметричность регулирования	По трем фазам	По трем фазам	По каждой фазе отдельно	По каждой фазе отдельно	По каждой фазе отдельно	По каждой фазе отдельно
Способ регулирования	Ручное	Автоматическое	Автоматическое	Автоматическое	Автоматическое	Автоматическое
Способ коммутации	Выключатель	Контакторы	Тиристорные ключи	Тиристорные ключи	Транзисторы	Транзисторы
Вероятность генерации (перекомпенсации)	Высокая	Низкая	Нет	Средняя	Нет	Нет
Потери, Вт/квар	3	3	3	10	7	3
Наличие защиты от высших гармоник	Нет	Действует на отключение	Нет необходимости	Нет необходимости	Нет необходимости	Нет необходимости
Предотвращение резонанса	Нет	Путем отключения	За счет установки фиксированных фильтров высших гармоник	Полное, с помощью реакторов	Полное, с помощью реакторов	Полное, с помощью реакторов
Стоимость (о.е.)	0,5	1,0	1,5	1,5	2	2,5

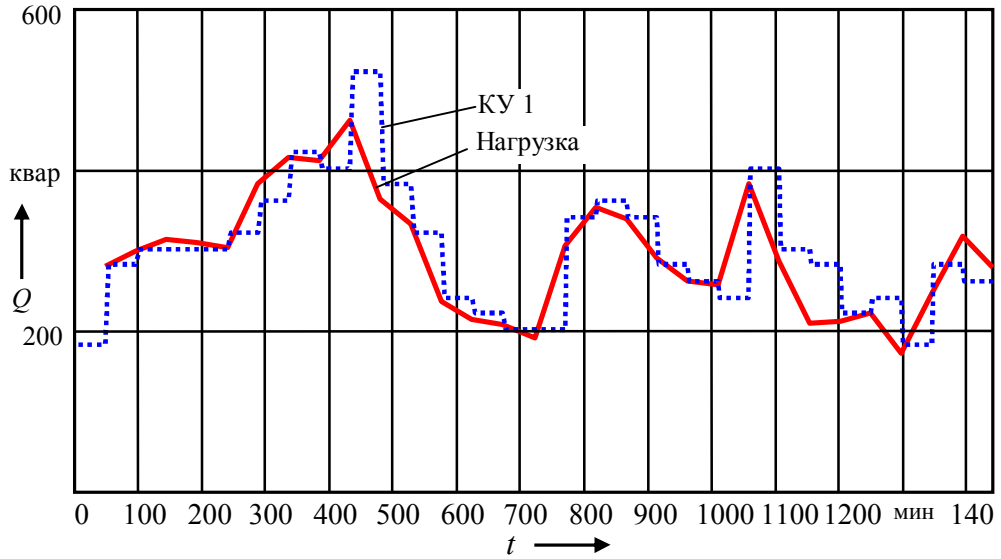


Рисунок 1 – Усредненный суточный график потребления реактивной мощности нагрузки и ступенчато-регулируемого КУ при ее «полной» компенсации

Компенсации РМ резкопеременной нагрузки должна выполняться с применением достаточно дорогих компенсаторов типа СТК или СТАТКОМ. В случае плавно изменяющейся или практически неизменной нагрузки достаточно использование батареи статических конденсаторов с постоянной или ступенчато изменяющейся реактивной мощностью меньшей стоимостью.

Сочетание компенсаторов различных типов для КРМ широко используется за рубежом (например, сочетание СТК и СТАТКОМа), однако вопросы разработки алгоритмов определения оптимального соотношения параметров таких устройств недостаточно проработаны в научном мире.

В данной статье будет показана реализация предлагаемого подхода к КРМ резкопеременной нагрузки. Суть подхода заключается в том, что компенсацию групповой резкопеременной нагрузки необходимо выполнять не одним компенсатором с высокой установленной мощностью и стоимостью, а группой устройств, причем большая доля реактивной мощности – неизменная составляющая – компенсируется БСК, а переменная составляющая – регулируемыми компенсаторами с учетом технической реализуемости. В данной работе представлен разработанный алгоритм определения оптимального состава и структуры компенсирующих устройств исходя из требуемой компенсации реактивной мощности неизменной и переменной составляющих по критерию минимума затрат.

Для идентификации параметров случайных процессов изменения нагрузок выполнена аппроксимация графика нагрузки реактивной мощности. Сравнительный анализ методов аппроксимации (приближение сигналов рядами Тейлора, сплайновая аппроксимация, полиномиальная аппроксимация, сглаживание методом наименьших квадратов, аппроксимация функции конечным рядом Фурье, аппроксимация функций ортогональными многочленами Чебышева, аппроксимация методом Безье и др.) показал, что наибольшая точность аппроксимации графиков, полученных цифровыми измерительными средствами, достигается с использованием аппроксимации функции конечным рядом Фурье.

Аппроксимирующую функцию $F_x(t)$ можно представить отрезком ряда Фурье:

$$F_x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{n} \left(a_i \cos(\omega_i t) + b_i \sin(\omega_i t) \right), \tag{1}$$

где a_0, a_i, b_i, ω_i – параметры ряда Фурье; n – число учитываемых гармоник (определяется проверкой на значимость оценок коэффициентов разложения).

В случае непериодических, нестационарных сигналов расчет коэффициентов разложения функции вычисляется по формулам Бесселя:

$$a_0 = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} y_k; \tag{2}$$

$$a_i = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} y_k \cos(\omega_i t); \tag{3}$$

$$b_i = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} y_k \sin(\omega_i t). \tag{4}$$

Среди методов оптимизации порядка модельной функции или числа членов ряда аппроксимирующего выражения (мера приближения, квадратичная мера (метод наименьших квадратов), мера наименьших модулей (метод Лагранжа), минимаксная мера (Чебышева) и др.) принят метод наименьших квадратов.

Аппроксимация с различным приближением выполнялась при минимизации дисперсии «шума» (рисунок 2):

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{0}^{n-1} \{x_i - m_{xi}\}^2 \to \frac{1}{n} \sum_{0}^{n-1} \sigma_i^2. \tag{5}$$

Модель аддитивного нестационарного случайного процесса изменения реактивной мощности можно представить в виде:

$$F(t) = m_x(t) + \varepsilon_x(t) + \delta(t), \tag{6}$$

где $x(t)$ – исследуемый процесс; $m_x(t)$ – математическое ожидание, зависящее от времени (детерминированная составляющая); $\varepsilon_x(t)$ – центрированный стационарный нормальный процесс; $\delta(t)$ – случайная составляющая процесса (шум).

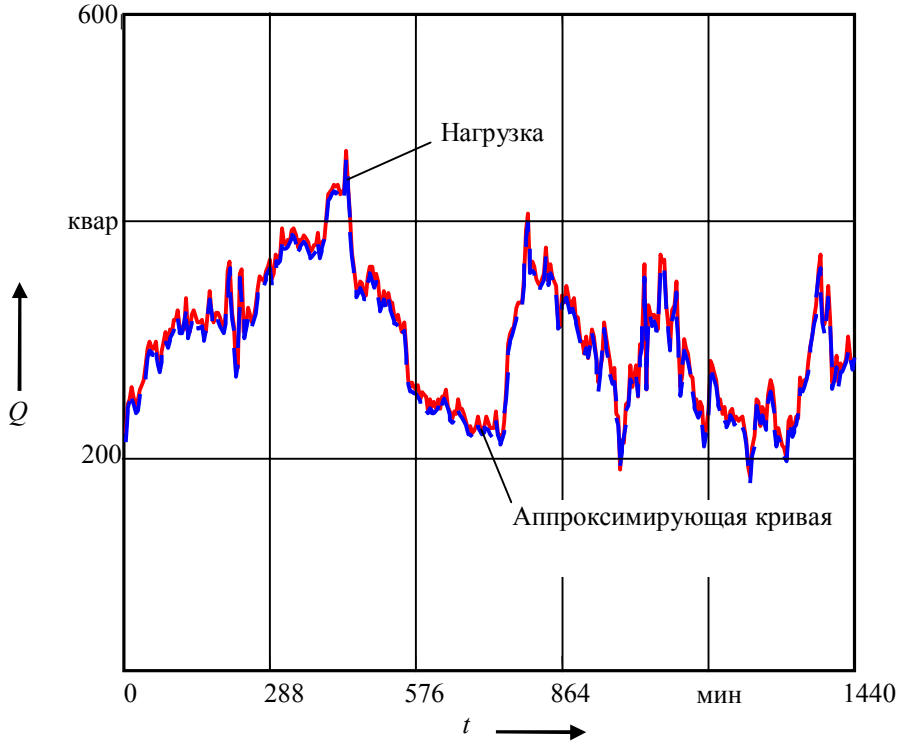


Рисунок 2 – Аппроксимация графика случайного изменения реактивной мощности

В соответствии с рекомендациями источников [2, 3] определяют следующие методы выделения детерминированной составляющей:

– путем сглаживания нестационарной реализации процессов скользящим или экспоненциальным осреднением;

– аппроксимацией полиномами;

– компенсацией стандартной составляющей на основе вычисления разностей n-го порядка;

– разделением составляющих по частотам и моделированием конечными рядами Фурье;

– компенсацией математического ожидания суточными разностями;

– путем декомпозиции по ортогональным векторам или функциям;

– путем нейросетевого или нечеткого моделирования (сглаживания) и др.

В соответствии с моделированием графика нагрузки конечными рядами Фурье модель (4) можно представить в аналитическом виде согласно выражениям (1) – (3).

Для моделирования КРМ ступенчатыми компенсаторами, определения времени работы КУ на ступени регулирования (квантование по времени), определения значений ступени регулирования (квантование по уровню) выполняется операция квантования графика нагрузки реактивной мощности.

Математически операция квантования функции $x(t)$ может быть выражена формулой:

$$x_i(t_i) = \left[\frac{x(t_i)}{\Delta\sigma} + \frac{1}{2}\right]\Delta\sigma, \tag{7}$$

где $\Delta\sigma$ – шаг квантования шкалы цифровых отсчетов; в квадратных скобках – целая часть.

Число делений шкалы (разрядность квантования)

$$N_\sigma = \left(s_{\max} - s_{\min}\right)\Delta\sigma, \tag{8}$$

где $s_{\max} - s_{\min}$ – диапазон шкалы квантования.

Погрешность округления заключена в пределах $-\Delta\sigma/2 < \varepsilon < \Delta\sigma/2$.

Дисперсия и среднее квадратическое значение шума квантования

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma^2}{12}; \tag{9}$$

$$\bar{\varepsilon} \approx 0,3\sigma. \tag{10}$$

Допустимое значение шага квантования: $\Delta\sigma \geq 3\varepsilon$.

Для определения пределов и условий технической реализуемости по КРМ конкретными устройствами необходимо исходный временной ряд графика нагрузки в соответствии с техническими возможностями рассматриваемых технических средств разложить на несколько аддитивных составляющих:

− низкочастотную – изменение функции тренда средних значений по большим интервалам усреднения (учет среднесуточных максимумов и минимумов нагрузки);

− среднечастотную;

− высокочастотную, вызванную резкими изменениями, флуктуациями параметров режима, а также случайными составляющими.

Условия технической реализуемости КРМ определяются параметрами технических средств (см. таблицу 1).

Основными методами разложения функции являются [2] разложение по эмпирическим модам, вейвлет-разложения, разложение в ряд Фурье и др.

При разложении функции применяется наиболее перспективный алгоритм эмпирической модовой декомпозиции сигнала, включающий в себя несколько операций.

Операция 1. Идентификация по координатам и амплитудам всех локальных экстремумов.

Операция 2. Сплайн-аппроксимация сигнала $y(x)$ по выделенным максимумам и минимумам. Определение функции средних значений $m_1(x)$ между огибающими, расчет первого приближения к первой функции моды:

$$h_1(x) = y(x) - m_1(x). \tag{11}$$

Операция 3. Повтор операции 1 и 2. Вместо $y(x)$ принимается функция $h_1(x)$. Определение второго приближения к первой функции моды – функции $h_2(x)$:

$$h_2(x) = h_1(x) - m_2(x). \tag{12}$$

Аналогично определяются третье и последующие приближения к первой функции моды. По мере увеличения количества итераций функция $m_n(x)$, равно как и функция $h_n(x)$, стремится к неизменяемой форме.

Критерием останова итераций является

$$\delta = \frac{\sum_x (h_{i\text{-}1}(x) - h_i(x))^2}{\sum_x (h_i(x))^2}. \tag{13}$$

Последнее i-е значение $h_i(x)$ итераций принимается за высокочастотную функцию моды $c_1(x) = h_i(x)$:

$$r_1(x) = y(x) - c_1(x). \tag{14}$$

Функция $r_1(x)$ обрабатывается как новые данные по аналогичной методике с нахождением второй модовой функции – $c_2(x)$, после чего итерационный процесс продолжается:

$$r_2(x) = r_1(x) - c_2(x); \tag{15}$$

$$y(x) = \sum_{i=1}^{n} c_i(x) - r_n(x). \tag{16}$$

Критерии прекращения процесса разложения: остаток $r_n(x)$ становится монотонной функцией без экстремумов; остаток $r_n(x)$ становится несущественным по своим значениям; относительная среднеквадратическая погрешность реконструкции сигнала применяется без учета остатка $r_n(x)$.

Для нерегулируемых БСК результатом с учетом условий технической реализуемости разложения будет постоянная составляющая графика нагрузки и (или) низкочастотная составляющая с f < 0,002 Гц. Для ступенчато регулируемых БСК и СТК критерием прекращения процесса разложения примем остаток со среднечастотной составляющей 0,002 Гц < f < 2 Гц. Высокочастотная составляющая для СТК и СТАТКОМа f > 2 Гц.

На рисунке 3 показан пример разложения графика нагрузки по РМ на составляющие: 1 – постоянная; 2 – среднечастотная; 3 – высокочастотная (точки соединены плавными линиями).

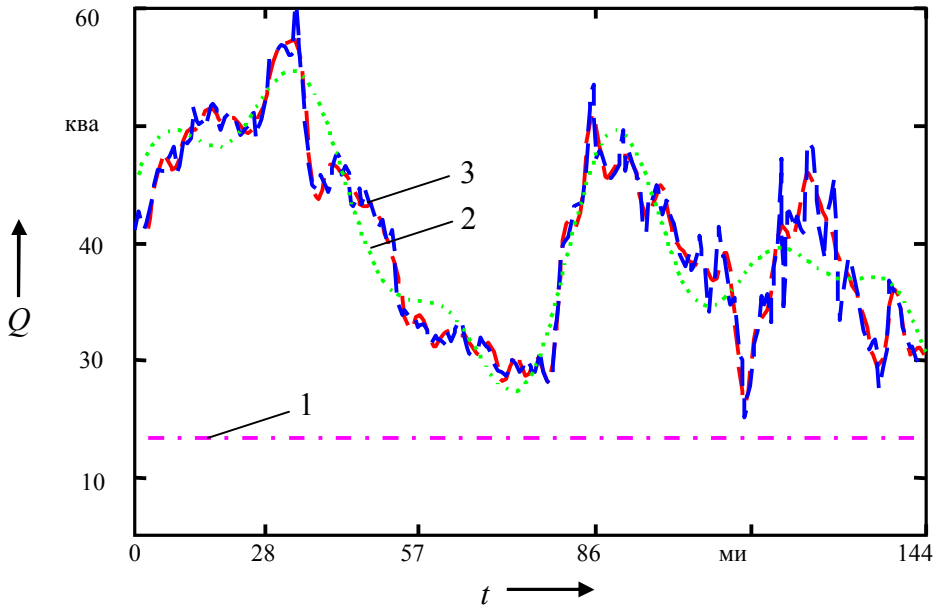


Рисунок 3 – Разложение графика реактивной нагрузки на составляющие

Полученные значения составляющих графика реактивной мощности необходимы в качестве ограничений при решении оптимизационной задачи определения структуры оборудования по минимуму приведенных затрат и являются предельными границами технической реализуемости КРМ указанными техническими средствами. К примеру, нерегулируемые БСК (КУ1) могут компенсировать только постоянную составляющую ступенчато регулируемые БСК (КУ2) – постоянную и среднечастотную составляющие, СТК и СТАТКОМ (КУ3) – постоянную, среднечастотную и высокочастотную. При этом предполагается, что приведенная стоимость технических средств БСК и СТК (например) будет ниже, чем использование СТК на всю установленную мощность. Предлагаемая оптимизационная модель позволит найти такое соотношение между установленными мощностями технических средств, чтобы при условии полной КРМ в соответствии с графиком нагрузки их приведенная стоимость была минимальной.

Целевая функция по критерию минимума приведенных затрат может быть представлена в виде:

$$Z_Q = \sum_{j=1}^{n} c_j(x_j) \cdot x_j \to \min \qquad (17)$$

при следующих условиях:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{m} x_j = b, \; j = \overline{1,n}; \\ c_j(x_j) = \begin{cases} c_{j,k} \quad if \;\; 0 < x_j < b_1; \\ ..... \\ \left(\dfrac{k}{x_j^r} + c_j \right) \; if \;\; b_1 < x_j < b_2; \end{cases} \\ \sum_{j=1}^{2} x_j \le b_j^{\text{const}}; \; \sum_{j=3}^{4} x_j \le b_j^{\text{сч}} - b_j^{\text{const}}; \; \sum_{j=5}^{6} x_j \le b_j^{\text{вч}} - b_j^{\text{сч}} - b_j^{\text{const}}, \\ b = k'b'; \; k' = \dfrac{tg'\varphi}{tg\varphi}; \; b' = Q(t)\big|_{t=t_i}, \end{cases} \qquad (18)$$

где $c_j(x_j)$ – приведенная стоимость j-го технического средства в функции установленной мощности с учетом потерь активной мощности в ТС, капитальных и эксплуатационных затрат, приведенных одному году (рисунок 4); $b_j^{\text{сч}}$, b_j^{const}, $b_j^{\text{вч}}$ – технически реализуемые пределы ТС по составляющим; $\sum_{j=1}^{m} x_j = b$ – условие баланса компенсации РМ; $b = k'b'$; $k' = \dfrac{tg'\varphi}{tg\varphi}$; $b' = Q(t)\big|_{t=t_i}$ – задание требуемого коэффициента реактивной мощности.

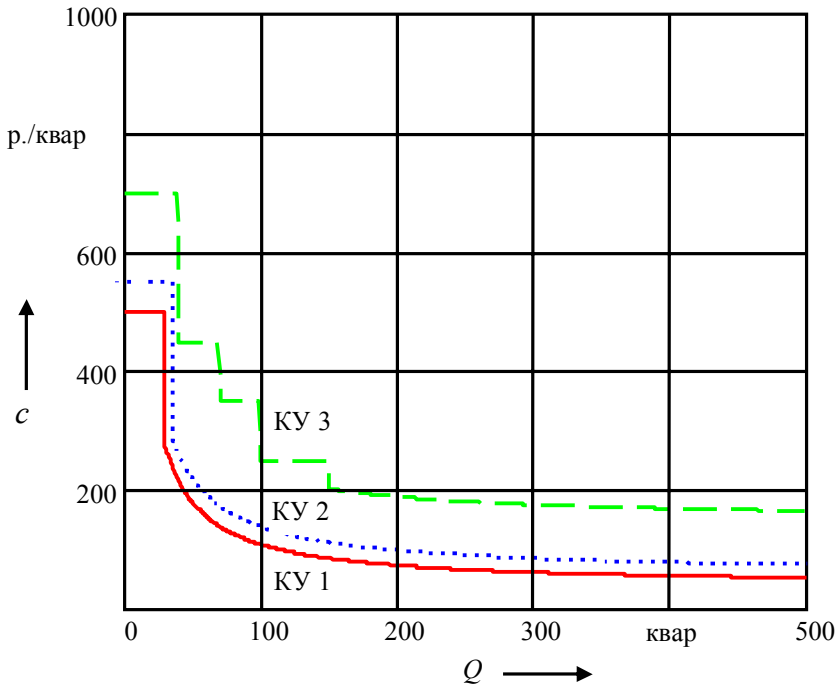


Рисунок 4 – Приведенная удельная стоимость КРМ (компенсации реактивной мощности)

Оптимизационная задача в виде постановки по выражениям (17), (18) и рисунок 4, как задача нелинейного программирования реализована методом сопряженных градиентов Флетчера – Ривса [5] в математическом программном продукте.

На рисунке 5 представлен результат расчета оптимальных графиков генерации РМ нерегулируемым БСК, ступенчато регулируемым БСК и СТК с усреднением в 100 точек (для наглядности).

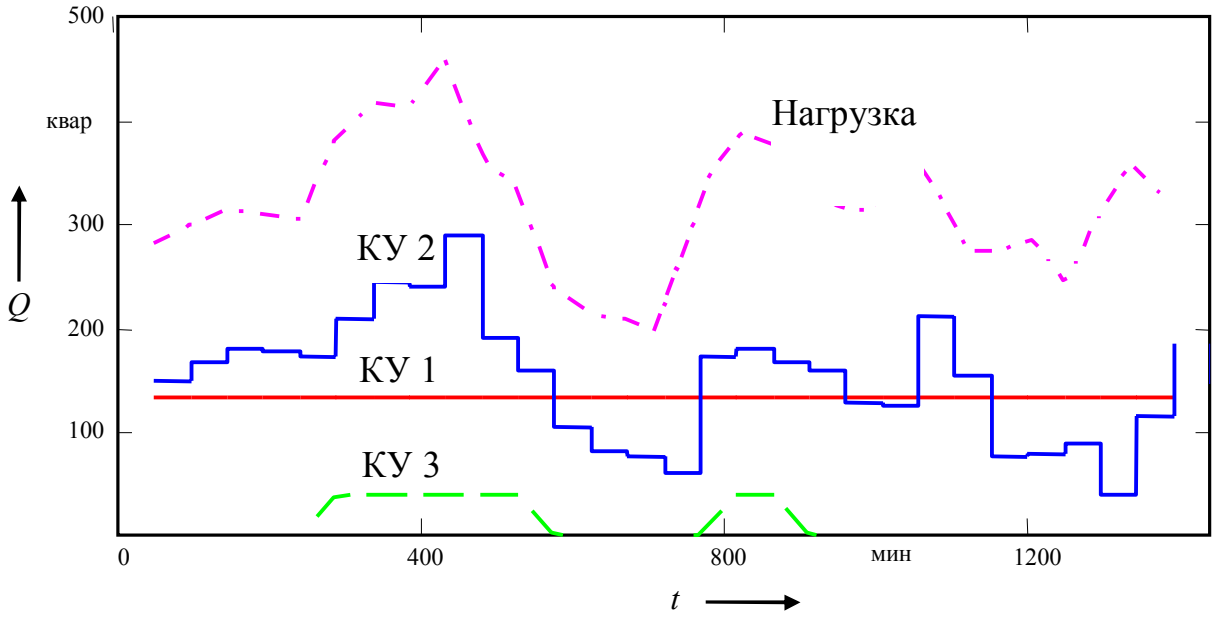


Рисунок 5 – Усредненный суточный график потребления реактивной мощности нагрузки и компенсирующих устройств различных типов при ее «полной» компенсации

Для выбора установленной мощности, количества и шага ступеней рассматриваемых компенсаторов строится гистограмма распределения мощности генерации РМ по каждому ТС согласно данным рисунка 5, определяются минимальные, максимальные значения, математическое ожидание, шаг изменения РМ (для ступенчато регулируемых БСК).

Эффект от использования предлагаемого подхода к выбору структуры и параметров ТС для КРМ заключается в снижении затрат. К примеру, если для полной компенсации РМ согласно указанному графику нагрузки с учетом высокочастотных составляющих использовать СТК типа КРМТ-0,4/500 450 тыс. р., а согласно оптимизации выбрать нерегулируемые КУ типа УК2-0,4-120У3 стоимостью 55 тыс. р., ступенчато регулируемый КУ типа УКМ58-0,4-300-25 У1,3 стоимостью 95 тыс.р., СТК типа КРМТ-0,4/50 стоимостью 120 тыс. р., то эффект составит 180 тыс. р., или 40 %. Кроме того, появляется возможность комбинировать размещение оборудования между нагрузкой и центром питания. Размещение СТК непосредственно рядом с резкопеременной нагрузкой позволит повысить эффективность применения ТС в целом за счет дополнительного снижения потерь.

Список литературы

1. Типовая инструкция по оптимальному управлению потоками реактивной мощности и уровнями напряжений в электрических сетях энергосистем. ТИ 34-70-002-82 [Текст] – М.: Энергоатомиздат. – 1982. – 86 с.

2. Четыркин, Е. М. Статистические методы прогнозирования [Текст] / Е. М. Четыркин. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.

3. Никитин, Ю. М. Метод статистического исследования нестационарных случайных процессов в электроснабжении // Электричество. 1971. – № 2. – С. 25 – 30.

4. Weng B. Optimal signal reconstruction using the empirical mode decomposition // Euroasip Journal on Advances in Signal Processing. – 2008. – vol. 4. P. 12 – 18.

5. Максимов, Ю. А. Алгоритмы решения задач нелинейного программирования [Текст] / Ю. А. Максимов / МИФИ. – М., 1982. – 324 с.

УДК 621.311.016.24

С. Н. Чижма

СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В статье рассмотрено понятие мощности для несинусоидальных и несимметричных цепей, выполнен анализ теорий мощности и определений реактивной и неактивной мощности, проведен анализ стандартов, в соответствии с которыми осуществляют измерения мощности, предложен алгоритм учета составляющих мощности несинусоидальных сигналов – полной, активной, обменной, мощности потерь, а также коэффициентов, показывающих структуру потерь в несинусоидальных цепях.

Электрические режимы систем электроснабжения электрифицированных железных дорог, в первую очередь систем тягового электроснабжения, характеризуются рядом параметров, основными из которых являются уровни напряжения в узлах, значения токов и мощностей в элементах системы. Чаще всего расчет баланса мощностей в нормальных установившихся режимах осуществляется при допущении, что эти режимы имеют симметричные напряжения и токи синусоидальной формы и номинальной частоты. В реальных условиях токи и напряжения всегда отличаются от идеальных.

В установившихся режимах, когда токи и напряжения несинусоидальны и несимметричны, необходим анализ потерь активной и реактивной мощности, вызванных этими искажениями. В настоящей работе рассмотрены и исследованы составляющие мощности, их соотношения и методики определения этих составляющих мощности при различных видах искажения.

В научном сообществе до сих пор нет единого определения понятия реактивной мощности при несинусоидальных напряжениях и токах. Сущность вопроса заключается в том, что при наличии гармонических компонентов в напряжениях и токах создаются несколько компонентов мгновенной мощности, которые не участвуют в чистой передаче энергии. Было сформулировано несколько подходов к группированию этих компонентов, предложено несколько теорий мощности и несколько определений реактивной и неактивной мощности [1].

Целью большинства этих теорий была попытка распространить свойства реактивной мощности в синусоидальных напряжениях и токах на системы с искажениями. Однако в настоящее время доказано, что распространить эти свойства на системы с искажениями невозможно. В связи с этим некоторые из предложенных определений были подвергнуты серьезной критике с физической точки зрения; на этот предмет в научном мире до сих ведутся оживленные дискуссии и пока нет единой общепринятой теории мощности, которая могла бы использоваться в качестве основы для взимания платы за использованную электроэнергию, оценки качества электропитания, определения источников гармонических искажений в системах электроснабжения и их компенсации.

Вследствие этого действующие стандарты описывают только синусоидальные системы и не дают основополагающего определения реактивной энергии (или мощности) при несинусоидальных напряжениях и токах. Точно так же нет конкретных требований по точности соответ-

ствующих проверок при наличии гармонических искажений. Единственный стандарт, относящийся к данной проблеме, – это IEEE 1459-2000 [2], но он не вводит конкретного определения реактивной мощности при несинусоидальных напряжениях и токах. В нем приводится набор определений для осуществления измерений параметров электропитания при синусоидальных и несинусоидальных напряжениях и токах, при сбалансированных и несбалансированных условиях. Эти определения основаны на отделении первых гармоник (с прямой последовательностью) напряжений и токов от всех других составляющих, которые считаются паразитными. Например, подчеркивается, что традиционно при расчетах за потребленное электричество используются такие параметры, как активная, реактивная и полная мощность основной гармоники и соответствующий коэффициент мощности.

В соответствии с требованиями международных стандартов для счетчиков активной энергии задается проверка точности при наличии гармоник. Счетчики для измерения реактивной энергии изготавливаются для работы только с синусоидальными напряжениями и токами. Указанные стандарты действительны для «общепринятого определения реактивной энергии синусоидальных напряжений и токов, содержащих только основную частоту».

Результаты измерения несинусоидальных (несимметричных) напряжений и токов могут быть представлены гармоническими и симметричными составляющими, что позволяет вести расчет потерь для отдельных гармонических и симметричных составляющих аналогично расчетам синусоидальных симметричных режимов. В этом случае дополнительные потери активной мощности в *i*-м элементе сети:

$$\Delta P_{\text{ДОП1}} = \sum_{A,B,C} \sum_{n} I_n^2 r_n + 3I_2^2 r_2 + 3I_0^2 r_0, \qquad (1)$$

где I_n, I_2 и I_0 – токи высших гармоник, обратной и нулевой последовательностей; r_n, r_2 и r_0 – сопротивление элемента данным токам.

Потери мощности являются составляющими баланса в уравнении баланса и часто определяются как небалансы мощности и энергии для анализируемой системы. В данной проанализируем существующие теоретические подходы к определению составляющих мощности в несинусоидальных несимметричных режимах и их связь с дополнительными потерями.

В работе [3] описана эквивалентная схема сети, изображенная на рисунке 1, а, показывающая взаимодействие основного потока мощности и потока мощности на гармонических частотах. Генератор Г представляет собой источник основного синусоидального напряжения, питающий через сопротивление системы $R_C + jX_C$ активную нагрузку, регулируемую статическим преобразователем.

Согласно рисунку 1, б генератор передает мощность $P_{\text{Г1}}$ через точку общего присоединения (ТОП). Большая часть передаваемой мощности $P_{\text{НГ1}}$ питает нагрузку, а меньшая часть $P_{\text{ПР1}}$ – преобразователь, превращаясь при этом в гармоники. Кроме того, необходимо учесть потери $P_{\text{С1}}$ в активном сопротивлении системы.

На рисунке 1, в представлена эквивалентная схема потока гармоник. Если напряжение генератора синусоидально, то оно может определять только основной поток мощности, следовательно, генератор может быть представлен в схеме гармоническим сопротивлением. На этой схеме на месте генератора появляется преобразователь в виде источника гармоник тока. Малая часть основной мощности $P_{\text{ПР1}}$, преобразованная в гармоническую мощность, возвращается в виде мощностей $P_{\text{СГ}}$ и $P_{\text{ГГ}}$ в сопротивление схемы и генератора соответственно. Большая часть мощности $P_{\text{НГГ}}$ потребляется в нагрузке. Так как $R_{\text{С}}$ и $R_{\text{НГ}}$ соединены последовательно, то соотношение $\frac{R_{\text{НГ}}}{R_{\text{СГ}} + R_{\text{ГГ}}}$ может быть записано в виде: $\frac{R_{\text{НГ}}}{R_{\text{С}} + R_{\text{Г}}}$. В реальных случаях это соотношение и мощность гармоник, проникающих в сеть переменного тока, остаются малыми даже при существенном искажении кривой тока.

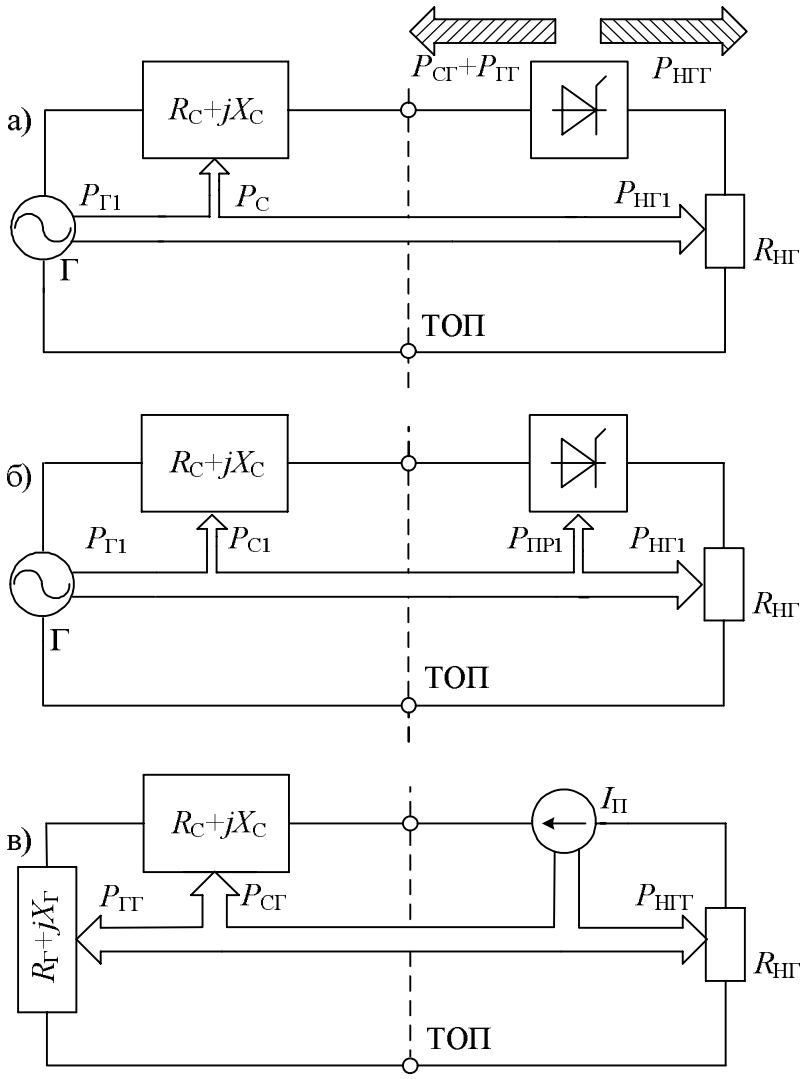


Рисунок 1 – Диаграммы основного и гармонических потоков мощности в системе переменного тока: а – общее распределение потока мощности; б – поток мощности основной частоты; в – поток мощности гармонических частот

Суммарные потери в сопротивлении системы состоят из потерь основной мощности $P_{С1}$, получаемой от генератора, и потерь гармонической мощности в преобразователе $P_{СГ}+P_{ТГ}$. При этом потери в системе больше потерь в соответствующей линейной нагрузке в $\frac{P_{СГ}+P_{ТГ}}{P_{С1}}$ раз.

На практике передача электроэнергии практически всегда осуществляется при наличии гармоник. Для таких систем известны две составляющие полной мощности [1]: реактивная мощность Q, или мощность сдвига, и мощность искажения T.

Единый подход в определении мощности искажения также отсутствует.

Так как понятие реактивной мощности для несинусоидальных сигналов до сих пор не имеет точного определения, примем подход, предлагаемый в источниках [4, 5] и состоящий в том, чтобы считать реактивную мощность только для основной гармоники.

Некоторые ученые [6, 7] предлагают считать мощность искажения T составляющей реактивной мощности, обусловленной высшими гармониками тока. Среднее значение мгновенной мощности, связанной с этими гармониками, за период также равно нулю, однако и эти гармоники вызывают дополнительные потери энергии в сети.

В однофазной системе полная мощность связана со своими составляющими соотношением:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}\ . \qquad (2)$$

Соответственно мощность искажения T можно определить как

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}\ . \qquad (3)$$

Графическая интерпретация полной, активной, реактивной мощности и мощности искажения представлена на рисунке 2 [8].

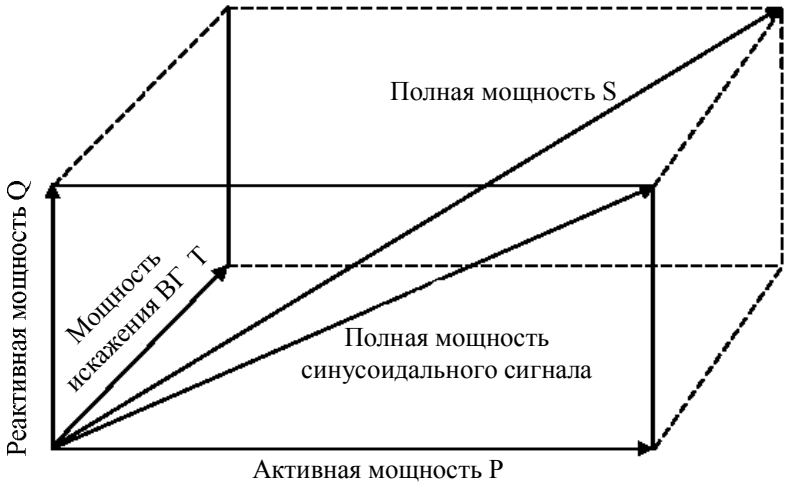


Рисунок 2 – Графическая интерпретация соотношения различных видов мощности

При этом подходе мощность, полученная из выражения $N = \sqrt{S^2 - P^2}$, является неактивной мощностью, состоящей из реактивной мощности и мощности искажений:

$$N = \sqrt{Q^2 - T^2}\ . \qquad (4)$$

Другой способ вычисления реактивной энергии с учетом ее знака [9] основан на разложении кривых тока и напряжения в ряды Фурье в интервале времени, кратном периоду питающего напряжения, на вычислении реактивной мощности для каждой гармоники. Результирующая реактивная мощность равна сумме реактивных мощностей всех гармоник.

Действующие стандарты описывают только синусоидальные системы и не дают основополагающего определения реактивной энергии (или мощности) при несинусоидальных напряжениях и токах. Точно так же эти стандарты не дают конкретных требований по точности соответствующих поверок при наличии гармонических искажений.

В стандарте IEEE 1459-2000 [2] определение параметров электропитания основано на отделении первых гармоник (с прямой последовательностью) напряжений и токов от всех других составляющих, которые считаются паразитными. Например, подчеркивается, что традиционно при расчетах за потребленное электричество используются такие параметры, как активная, реактивная и кажущаяся мощность основной гармоники и соответствующий коэффициент мощности.

Стандарт IEEE 1459-2000 определяет методологию учета неактивной мощности следующим образом.

В однофазных системах определение действующего значения напряжения U_1 и тока I_1 основывается на определении мгновенных измеренных значений напряжения u и тока i. При наличии высших гармоник U_H и I_H действующие значения напряжения и тока определяются как

$$\begin{cases} U^2 = U_1^2 + U_H^2; \\ U_H^2 = \sum_{n \neq 1} U_n^2 = U^2 - U_1^2; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} I^2 = I_1^2 + I_H^2; \\ I_H^2 = \sum_{n \neq 1} I_n^2 = I^2 - I_1^2, \end{cases} \quad (6)$$

где U и I – среднеквадратические значения тока и напряжения соответственно. Индекс «1» означает основную гармонику, H – сумму всех высших гармоник.

Полная (кажущаяся) мощность определяется как

$$S^2 = (UI)^2 = S_1^2 + S_N^2, \quad (7)$$

где S_1 и S_N – мощность гармоники основной частоты и высших гармоник, при этом

$$S_1^2 = (U_1 I_1)^2. \quad (8)$$

Второе слагаемое формулы (7) состоит из трех компонентов искомых гармонических искажений: токовые искажения мощности D_I, искажения мощности, вызванные искажениями напряжения D_U, и полная мощность высокочастотных гармоник S_H и определяется как

$$S_N^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_H^2 = (U_1 I_H)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_H I_H)^2. \quad (9)$$

Значение S_N^2 может быть определено через полную мощность:

$$S_N = \sqrt{S^2 - (U_1 I_1)^2}. \quad (10)$$

Первое слагаемое S_1 в формуле (7) определяет величину мощности основной частоты, отдаваемой в нагрузку, физический смысл второго слагаемого S_N – часть мощности источника, которая теряется из-за возникновения высокочастотных гармоник. Наиболее информативным показателем для характеристики уровня гармоник является фактор гармоник, который можно определить как

$$K_S = \frac{S_N}{S_1}. \quad (11)$$

Таблица 1 – Показатели мощности однофазной несинусоидальной системы

Вид мощности	Несинусоидальный сигнал	Основная гармоника	Высокочастотные гармоники
Полная мощность, В·А	S	S_1	S_N S_H
Активная мощность, Вт	P	P_1	P_H
Неактивная мощность, вар	N	Q_1	D_I D_U S_H
Показатели искажений	$K_M = P/S$	$K_{M1} = P_1/S_1$	$K_S = S_N/S_1$

Активная мощность периодического тока произвольной формы определяется как средняя мощность за период:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T uidt, \quad (12)$$

полная мощность S – по выражению (4).

Активная и реактивная мощности основной гармоники могут быть определены как

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1; \quad (13)$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin\varphi_1. \quad (14)$$

Величины U_H и I_H можно определить из уравнения (10) как сумму амплитуд высокочастотных гармоник.

Для цепи с высокочастотными искажениями сигнала определяются величина неактивной мощности, обусловленная реактивной мощностью, и мощность высокочастотной составляющей сигнала, определяемая разностью полной и активной энергии:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}. \tag{15}$$

Коэффициенты, показывающие общие гармонические искажения напряжения и тока, определяются из выражений:

$$K_{HU} = \frac{U_H}{U_1} = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1}; \tag{14}$$

$$K_{HI} = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1}. \tag{16}$$

Коэффициент мощности – это мера того, насколько эффективно потребителю поставляется активная мощность, определяется по формуле:

$$K_{\text{М}} = \frac{P}{S}, \tag{15}$$

из которой следует, что максимальная эффективность электроэнергетической системы будет достигнута при нулевой неактивной мощности.

На рисунке 3 представлен алгоритм контроля составляющих мощности в несинусоидальных цепях и коэффициентов, показывающих структуру потерь в этих цепях.

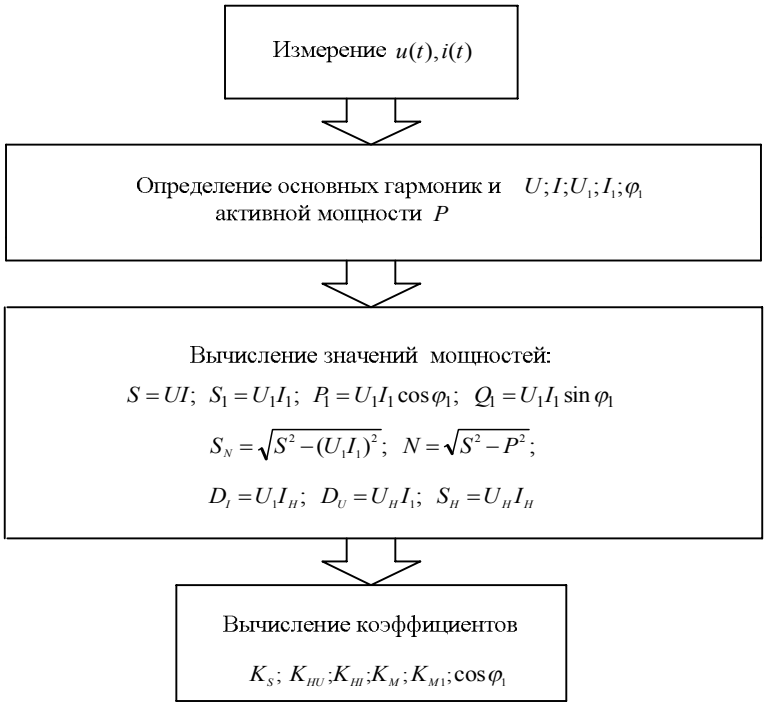


Рисунок 3 – Алгоритм определения мощности в однофазной цепи с несинусоидальными сигналами

Для трехфазной симметричной цепи активная мощность вычисляется по формуле:

$$P = \sum_{r=A,B,C} P_r = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \cos\varphi, \tag{16}$$

где r – указатель фазы, $U_{\text{Ф}}$ и $I_{\text{Ф}}$ – фазные напряжения и токи.

В случае соединения трехфазной цепи звездой $U_{\text{Ф}} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}$, $I_{\text{Ф}} = I_{Л}$ ($U_{\text{Л}}$ и $I_{\text{Л}}$ – линейные напряжения и токи), треугольником – $U_{\text{Ф}} = U_{Л}$ и $I_{\text{Ф}} = \frac{I_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}$.

Независимо от вида соединения, звезда или треугольник, активная мощность

$$P = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos\varphi. \tag{17}$$

Аналогично для реактивной и полной мощностей

$$Q = \sum_{r=A,B,C} Q_r = 3U_{\text{Ф}} I_{\text{Ф}} \sin\varphi = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin\varphi; \tag{18}$$

$$S = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}}. \tag{19}$$

Для несимметричной трехфазной системы суммарное значение активной и полной (алгебраическое значение) мощностей равны соответственно [5, 6]:

$$\begin{aligned} P &= P_A + P_B + P_C; \\ S &= S_A + S_B + S_C. \end{aligned} \tag{20}$$

При несимметрии трехфазной цепи возникают дополнительные потери мощности из-за несимметрии. Для определения полной мощности в трехфазных цепях вводят понятие мощности несимметрии H в дополнение к мощностям активной, реактивной и искажения [1, 6].

Мощность несимметрии H учитывает дополнительные потери энергии, связанные с неравномерным распределением тока по фазам многофазной цепи. В однофазных и многофазных симметричных системах мощность несимметрии равна нулю.

В общем случае полная мощность связана со своими составляющими известным выражением [6] вида:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2 + H^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2 + S_2^2 + (3n+1)S_0^2}, \tag{21}$$

где S_2 и S_0 – полная мощность обратной и нулевой последовательности соответственно,

$$T^2 = 3U^2 \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_{An}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Bn}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Cn}^2 + n_0 \sum_{n=2}^{\infty} I_{Nn}^2 \right), \tag{22}$$

где n_0 – коэффициент увеличения сопротивления нулевого провода трехфазной четырехпроводной системы.

Степень несимметрии системы характеризует коэффициент несимметрии, который определяется из равенства:

$$K_{HC} = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2 + T^2)}}{S}. \tag{23}$$

При контроле реактивной мощности следует пользоваться алгоритмами, разработанными для отдельных составляющих, обусловленных гармониками и несимметрией. При этом составляющие мощности могут определяться по соответствующим токам и напряжениям высших гармоник и составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Для четырехпроводных сетей (фазные токи и напряжения):

$$\begin{cases} P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1,\ Q_1 = 3U_1 I_1 \sin\varphi_1; \\ P_2 = 3U_2 I_2 \cos\varphi_2,\ Q_2 = 3U_2 I_2 \sin\varphi 2; \\ P_0 = 3U_0 I_0 \cos\varphi_0,\ Q_0 = 3U_0 I_0 \sin\varphi_0; \\ P_{n\Sigma} = \sum\limits_{A,B,C}\sum\limits_{n=2} U_n I_n \cos\varphi_n,\ Q_{n\Sigma} = \sum\limits_{A,B,C}\sum\limits_{n=2} nU_n I_n \sin\varphi_n; \end{cases} \tag{24}$$

для трехпроводных цепей (линейные токи и напряжения) –

$$\begin{cases} P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi_1,\ Q_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \sin\varphi_1; \\ P_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_2,\ Q_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 \sin\varphi_2; \\ P_{n\Sigma} = \sqrt{3}U_n I_n \cos\varphi_n,\ Q_n = \sqrt{3}U_n I_n \sin\varphi_n. \end{cases} \tag{25}$$

Системы уравнений (24), (25) справедлива при симметричных токах и напряжениях высших гармоник. Необходимые расчеты и анализ проводятся на соответствующей частоте гармоники и последовательности симметричной составляющей.

Активная составляющая мощности характеризует необратимые преобразования электрической энергии в другие виды энергии и при несинусоидальных и несимметричных токах и напряжениях в трехфазной:

$$P_\Sigma = P_1 + P_{n\Sigma} + P_2 + P_0. \tag{26}$$

Полагая, что энергия высших гармоник и обратной (нулевой) последовательности практически не совершает полезной работы, для исследуемой электрической системы при несинусоидальных и несимметричных токах и напряжениях дополнительные потери мощности

$$\Delta P_{ДОП} = P_{n\Sigma} + P_2 + P_0. \tag{27}$$

Энергетические преобразования в искаженных режимах сопровождаются обменными процессами, которые приводят к дополнительным потерям активной мощности и энергии, схожим по своей природе с потерями от протекания реактивной мощности в синусоидальных симметричных режимах. Таким образом, дополнительные потери будут складываться из потерь, обусловленных протеканием как активных, так и реактивных составляющих мощностей искажения.

В соответствии с требованиями стандарты [2] предлагается следующая методика оценки показателей мощности в несимметричных трехфазных системах. Вводятся обобщающие понятия эффективного напряжения и тока, которые для трехфазной четырехпроводной линии определяются как

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2)}; \tag{28}$$

$$U_e = \sqrt{\frac{3(U_a^2 + U_b^2 + U_c^2) + \xi(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)}{9(1+\xi)}}, \tag{29}$$

а для трехфазных трехпроводных линий –

$$U_e = \sqrt{\frac{U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2}{9}}; \tag{30}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}. \tag{31}$$

На основе полученных из уравнений (28) – (31) значений токов и напряжений вычисляется полная эффективная мощность:

$$S_e = 3U_e I_e. \tag{30}$$

Далее определяются полная эффективная мощность основной S_{e1} и высших гармоник S_{eN}. После этого выполняется преобразование Парка, которое преобразует пространственную ориентацию векторов напряжения и токов из трехфазной неподвижной системы во вращающуюся двухфазную и определяются напряжение U^{+}_{1}, ток I^{+}_{1} и полная мощность S^{+}_{1} прямой последовательности основной гармоники.

Как и в однофазной цепи, показателем уровня высокочастотных искажений является фактор гармоник, который можно определить как

$$K_S = \frac{S_{eN}}{S_{e1}}. \tag{31}$$

Для обозначения величины небаланса трехфазной системы введены следующие показатели. Полная мощность основной гармоники состоит из полных мощностей положительной последовательности S^{+}_{1} и небаланса S_{u1}:

$$S_{e1}^2 = S_1^{+2} + S_{u1}^2. \tag{32}$$

Величину несимметрии характеризует коэффициент небаланса

$$K_N = \frac{S_{u1}}{S_1^{+}}. \tag{33}$$

На рисунке 4 приведен алгоритм определения показателей мощности трехфазных несимметричный цепей. Значение индексов в приведенном алгоритме: «1» – основная гармоника; «+» – положительная последовательность; «е» – эффективное значение.

Рисунок 4 – Алгоритм определения показателей мощности трехфазных несимметричный цепей

На основании изложенного можно сделать определенные выводы.

1. При наличии гармонических искажений в напряжениях и токах в электрических цепях создаются несколько компонентов мгновенной мощности, которые не участвуют в передаче

энергии. Существующее понятие реактивной энергии не отражает полностью процессов, происходящих в электрических цепях.

2. Предлагается отдельно учитывать составляющую мощности, обусловленной высшими гармониками сигнала, а реактивную (обменную) мощность определять только на основной гармонике.

3. Мощность искажений предлагается определять из токовых искажений мощности, искажений мощности, вызванных искажениями напряжения и полной мощности высокочастотных гармоник.

4. При наличии несимметрии необходимо учитывать мощность несимметрии, которая характеризует дополнительные потери энергии, связанные с неравномерным распределением тока по фазам многофазной цепи.

Список литературы

1. Баков, Ю. В. Мощность переменного тока [Текст] / Ю. В. Баков / Ивановский гос. энерг. ун-т. – Иваново. 1999. – 200 с.

2. IEEE Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions: IEEE Std 1459-2000. – IEEE, 2002. – 52 p.

3. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах [Текст] / Дж. Аррилага, Д. Бредли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

4. Жежеленко, И. В. О методах расчета реактивной мощности при несинусоидальных режимах [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Промышленная энергетика. – 1985.– №12. – С. 44 – 48.

5. Мельников, Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях [Текст] / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1975. – 128 с.

6. Дрехслер, Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке [Текст] / Р. Дрехслер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.

7. Маевский, О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей [Текст] / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

8. Машкин А. Г. Мощность искажения в системах тягового электроснабжения [Текст] / А. Г. Машкин // Электрика. – 2006. – № 6. – С. 29 – 33.

9. Кадомский, Д. Е. Активная и реактивная мощности – характеристики средних значений работы и энергии периодического электромагнитного поля в элементах нелинейных цепей [Текст] / Д. Е. Кадомский // Электричество. – 1987. – № 7. – С. 39 – 43.

УДК 519.65

Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ОДНОТОНАЛЬНОГО СИГНАЛА

В статье произведен анализ эффективности методов определения частоты однотонального сигнала. В работе рассматрены алгоритмы: метод Якобсена (Jacobsen's Modified Quadratic Estimator), метод Маклеода (Macleod's Estimator), два метода Квина (Quinn's Estimator, Quinn's Second Estimator) и метод корреляционных функций. Для всех методов произведена оценка точности определения частоты при различных уровнях шума.

Определение параметров спектра сигналов в тяговой сети железнодорожного транспорта является важным элементом контроля качества электрической энергии и, как следствие,

важной составляющей систем повышения энергоэффективности. Сигналы в указанных сетях имеют ярко выраженную основную гармонику с частотой, используемой в промышленных сетях, т. е. с некоторыми ограничениями эти сигналы его можно считать однотональными. В статье рассматривается проблемы определения частоты по ограниченному количеству отсчетов сигнала.

Основным инструментом для решения данной проблемы является дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Однако ДПФ не способно точно определить частоту сигнала, когда максимум ДПФ не совпадает с положением основной гармоники сигнала, что наглядно отражено на рисунке 1.

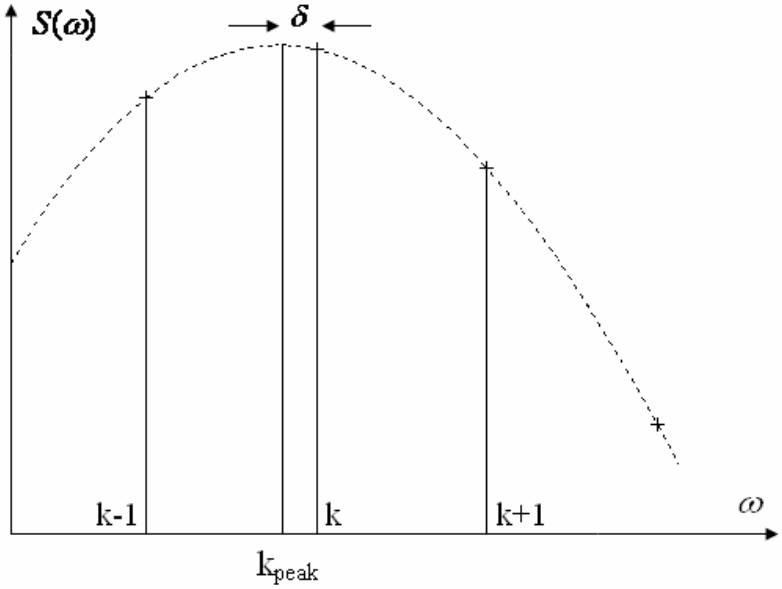


Рисунок 1 – Случай несовпадения максимума дискретного преобразования Фурье и непрерывного спектра сигнала

На рисунке 1 номера максимального отсчета ДПФ и двух соседних обозначены как k, $k+1$ и $k-1$ соответственно. Частота основной гармоники сигнала обозначенна как k_{peak}, разность между максимальным отсчетом ДПФ и частотой основной гармоники сигнала – δ .

Частота сигнала является его базовым параметром, от которого определение нахождение амплитуды и фазы. В статье производится сравнительный анализ методов, оценивающих частоту сигнала, заданного набором дискретных отсчетов.

Рассмотрим периодический сигнал $s(t)$ с периодом T_s и спектром, ограниченным N-й гармоникой и «белым шумом» $\eta(t)$:

$$s(t) = \sum_{v=0}^{v=N} A_v \cos\left(\frac{2\pi}{T_s} v \cdot t + \varphi_v\right) + \eta(t), \qquad (1)$$

где A_v и φ_v – амплитуда и фаза v-й гармоники.

Для определения номера отсчета максимума ДПФ необходимо определить параметр δ, который может быть как положительным, так и отрицательным, а затем, зная параметр δ, можно определить частоту и другие параметры сигнала.

Параметр δ является разностью между положением отсчета максимальной частоты, найденного с использованием ДПФ, и положением гармоники истинной максимальной частоты. Положение гармоники истинной максимальной частоты и частота определяются по формулам:

$$k_{peak} = k + \delta; \qquad (2)$$

$$f = k_{peak}\frac{f_s}{N}, \tag{3}$$

где f_s – частота дискретизации;

N – число точек ДПФ.

1. Метод Якобсена (Jacobsen's Modified Quadratic Estimator).

Все методы, кроме метода корреляционных функций, являются интерполяционными алгоритмами для нахождения параметров сигнала. Сутью метода интерполирования является нахождение промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений, т. е. кривая построенной функции должна точно пройти через имеющиеся точки данных.

В методе Якобсена положение максимального коэффициента сигнала определяется с использованием двух смежных коэффициентов ДПФ. В качестве интерполируемой функции выступает квадратичная функция, графиком которой является парабола, которая близка к спектру функции исследуемого сигнала (вершина параболы и максимальное значение спектра делят графики пополам).

Обозначим для квадратичной функции y максимальный коэффициент функции $y(k)$ и истинный коэффициент, достигнутый в максимуме $y(k+\delta)$. Тогда значение функции y в выбранных точках $k-1$, k и $k+1$ можно описать так:

$$y(k-1) = a(k-1-\delta)^2 + b; \tag{4}$$

$$y(k) = a(k-\delta)^2 + b; \tag{5}$$

$$y(k+1) = a(k+1-\delta)^2 + b. \tag{6}$$

Установив параметр k равным 0, получим выражение для расчета δ:

$$\delta = \frac{0,5\left(y(k+1)-y(k-1)\right)}{2y(k)-y(k+1)-y(k-1)}. \tag{7}$$

Далее произведем простую адаптацию формулы (5) для возможности оценки частоты комплексных значений ДПФ:

$$\delta = \mathrm{Re}\left(\frac{\left(y(k+1)-y(k-1)\right)}{2\cdot y(k)-y(k+1)-y(k-1)}\right). \tag{8}$$

Используя формулы (2) – (3), определяем номер отсчета максимальной частоты и частоту сигнала.

2. Методы Квина (Quinn's Estimator, Quinn's Second Estimator).

Первый метод Квина подробно описан в работах [3, 6], он основан на выборе одной из двух оценок – δ_1 и δ_2, в зависимости от значений соседних точек ДПФ:

$$\delta_1 = \frac{\mathrm{Re}\left(\dfrac{y(k-1)}{y(k)}\right)}{1-\mathrm{Re}\left(\dfrac{y(k-1)}{y(k)}\right)}; \tag{9}$$

$$\delta_2 = \frac{\mathrm{Re}\left(\dfrac{y(k+1)}{y(k)}\right)}{1-\mathrm{Re}\left(\dfrac{y(k+1)}{y(k)}\right)}. \qquad (10)$$

Если получившиеся значения δ_1 и δ_2 больше 0, то искомое значение δ равно δ_2, в противном случае – δ_1.

Аналогичным образом, как и в предыдущем методе, определяются порядок максимального коэффициента и частота.

В источнике [3] можно найти описание метода Quinn's Second Estimator. Разработчик алгоритма определяет параметр δ из выражения:

$$\delta = \frac{\hat{a}_{-1} + \hat{a}_{+1}}{2} + k(\hat{a}_{+1}) - k(\hat{a}_{-1}), \qquad (11)$$

где $k(*)$ определяется из выражения (9);

$\hat{a}_{-1}$ и $\hat{a}_{+1}$ – из выражений (13, 14), β_{-1} и β_{+1} из выражений (15, 16).

$$k(x) = \tfrac{1}{4}\log\left(3x^4 + 6x^2 + 1\right) - \tfrac{\sqrt{6}}{24}\log\left(\frac{x^2 + 1 - \sqrt{2/3}}{x^2 + 1 + \sqrt{2/3}}\right); \qquad (12)$$

$$\hat{a}_{-1} = \frac{-\beta_{-1}}{\beta_{-1} - 1}; \qquad (13)$$

$$\hat{a}_{+1} = \frac{-\beta_{+1}}{\beta_{+1} - 1}; \qquad (14)$$

$$\beta_{-1} = \mathrm{Re}\left(\frac{y(k-1)}{y(k)}\right); \qquad (15)$$

$$\beta_{+1} = \mathrm{Re}\left(\frac{y(k-1)}{y(k)}\right). \qquad (16)$$

Аналогичным образом, как и в предыдущих методах, определяются номер отсчета максимальной частоты и частота сигнала.

3. Метод Маклеода (Macleod's Estimator).

Базовая часть метода Маклеода похожа на базовую часть метода Якобсена:

$$\chi = \frac{R(1) - R3)}{2R(2) + R(1) + R(3)}, \qquad (17)$$

где

$$r = y(k); \qquad (18)$$

$$R(n) = \mathrm{Re}\{y(n) \cdot r^*\}. \qquad (19)$$

Параметр δ определяется из выражения:

$$\delta = \frac{\sqrt{1 + 8\chi^2} - 1}{4\chi}. \qquad (20)$$

Аналогичным образом, как и в методе Якобсена, определяются номер отсчета максимальной частоты и частота сигнала.

4. Метод корреляционных функций.

Для исследуемой функции сигнала формируется набор эталонов. С этой целью необходимо определить базовую точку, вокруг которой будут создаваться эталоны (обозначим ее через K) [1]. Базовая точка выбирается из ближайших целых значений частоты измеряемого сигнала. Необходимо определить также шаг, с которым будут формировать эталоны (обозначим его через h). Затем на промежутке $\left[K-\frac{1}{2},\ K+\frac{1}{2}\right]$ следует произвести формирование эталонов. Для этого спектр оконной функции необходимо сдвигать вправо и влево с шагом h в пределе заданного промежутка и определять пять точек вокруг базовой точки K. Далее производится анализ на наличие связи в точках между параметрами взвешенного сигнала и эталона, т.е. производиться определение коэффициента корреляции.

Возможность смещать спектр на заданную величину без изменения амплитудного спектра обеспечивается свойством ДПФ [2]. Согласно данному свойству необходимо спектр окна домножить на величину $e^{-j\cdot\frac{2\cdot\pi\cdot i\cdot(K\pm h)}{T_w}}$. Таким образом, получается набор эталонных множеств из M точек $W_j=\{W_{j0},W_{j1},...,W_{jM}\}$, каждая точка которого вычисляется по правилу:

$$W_{ji}=W\left(\frac{2\pi}{T_w}\cdot\left(i+\Delta r_j\right)\right), \tag{21}$$

где $-\frac{M}{2}<i<\frac{M}{2},\ 0<\Delta r_j<1.$

Пусть имеется сигнал $s(t)$. Наложим на данный сигнал некоторое окно $w(t)$, имеющее отличное от нуля значение на временном отрезке $\left[-\frac{T_w}{2},\frac{T_w}{2}\right]$, со спектром $W(\omega)$ для ограничения длительности этого сигнала. В качестве оконной функции автор метода использует окно Кайзера.

Процесс наложения окна представляет собой домножение неограниченного во времени сигнала $s(t)$ на ограниченную во времени функцию $w(t)$. Процесс наложения показан на рисунке 2.

Таким образом, в результате наложения окна на сигнал получается новый, ограниченный во времени сигнал:

$$s(t)=s(t)\cdot w(t)=\sum_{v=0}^{v=N}A_v e^{j\cdot\varphi_v}w(t)\cdot e^{j\cdot\frac{2\cdot\pi}{T_s}\cdot v\cdot t}+\eta(t)\cdot w(t)\,. \tag{22}$$

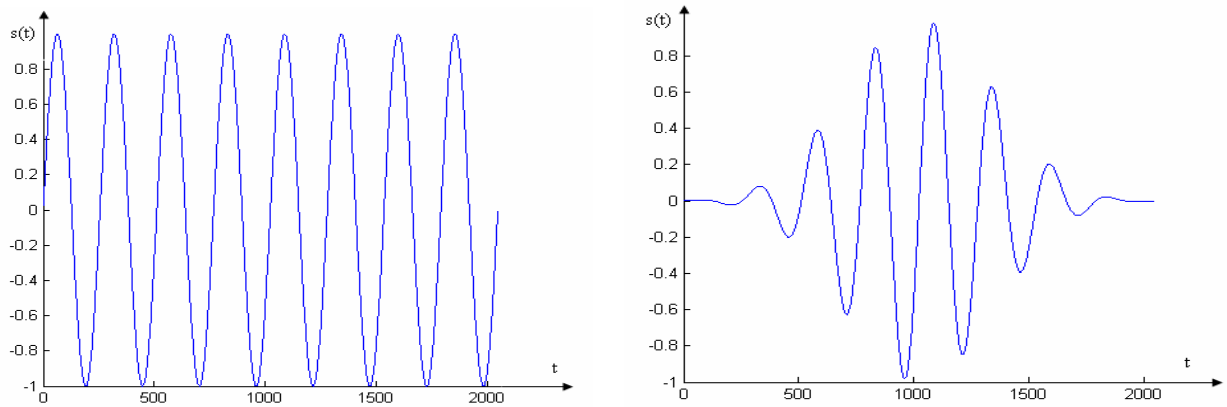


Рисунок 2 – Вид сигнала до (а) и после (б) наложения на него окна

Спектр сигнала $w(t)\cdot e^{j\cdot\frac{2\cdot\pi}{T_s}\cdot v\cdot t}$, как известно из свойств преобразования Фурье, представляет собой смещенный на величину $\frac{2\pi}{T_s}v$ спектр сигнала w(t), а именно $W\left(\omega-\frac{2\pi}{T_s}v\right)$ [2]. Спектр сигнала $\eta(t)\cdot w(t)$ обозначим через $\Theta_w(\omega)$.

Следовательно, спектр полного сигнала s(t) представляет собой взвешенную сумму спектров наложенного окна $W\left(\omega-\frac{2\pi}{T_s}v\right)$ и случайной величины $\Theta_w(\omega)$:

$$Y(\omega)=\sum_{v=0}^{v=N}A_v e^{j\cdot\varphi_v}W\left(\omega-\frac{2\pi}{T_s}v\right)+\Theta_w(\omega). \qquad (23)$$

Далее задача измерения гармоники сигнала $s(t)$, ограниченного во временной области окном w(t), сводится к нахождению коэффициента A_v и фазы φ_v по M точкам функции $Y(\omega)$ в области v-го пика.

Найдем значение функции $Y(\omega)$ в точках M. Так как эти точки получаются при помощи вычисления ДПФ дискретизированного сигнала на временном отрезке T_w (ширина окна), то в результате применения этого данного алгоритма получается значение спектра в равномерно отстоящих точках $\omega=\frac{2\pi}{T_w}n$. Подставляя в выражение (23) получаем, что в районе пика v ДПФ будет иметь следующие значения:

$$Y\left(\frac{2\pi}{T_w}n\right)=\sum_{v=0}^{v=N}A_v e^{j\cdot\varphi_v}W\left(\frac{2\pi}{T_w}n-\frac{2\pi}{T_s}v\right)=\sum_{v=0}^{v=N}A_v e^{j\cdot\varphi_v}W\left(\frac{2\pi}{T_w}\left(n-\frac{T_w}{T_s}v\right)\right). \qquad (24)$$

Пусть целая часть выражения $n-\frac{T_w}{T_s}v$ равна r, а дробная часть равна Δr, тогда получаем:

$$Y\left(\frac{2\pi}{T_w}n\right)=\sum_{v=0}^{v=N}A_v e^{j\cdot\varphi_v}W\left(\frac{2\pi}{T_w}\left(r+\Delta r\right)\right). \qquad (25)$$

Таким образом, получается реализация ДПФ периодического сигнала, ограниченного окном, для которой $Y=\{Y_0,Y_1,...,Y_M\}$ – множество из M точек этого ДПФ в области пика v.

Найдем коэффициент корреляции между множеством Y и эталоном W_j:

$$\sum_{i=-\frac{M}{2}}^{i=\frac{M}{2}}Y_i\cdot W_{ji}=\sum_{i=-\frac{M}{2}}^{i=\frac{M}{2}}A_v e^{j\cdot\varphi_v}W\left(\frac{2\pi}{T_w}\left(i+\Delta r\right)\right)\cdot W\left(\frac{2\pi}{T_w}\left(i+\Delta r_j\right)\right)=A_v e^{j\cdot\varphi_v}R\left(\Delta r-\Delta r_j\right), \qquad (26)$$

где $R\left(\Delta r-\Delta r_j\right)$ – корреляционная функция функций $W\left(\frac{2\pi}{T_w}\left(i+\Delta r\right)\right)$ и $W\left(\frac{2\pi}{T_w}\left(i+\Delta r_j\right)\right)$.

Если в качестве окна выбирается симметричная функция, то функция $W(\omega)$ и множество ее значений W_{ji} будут действительными. С учетом этого получаем соответственно модуль амплитуды v-й гармоники:

$$A_v=\frac{1}{R\left(\Delta r-\Delta r_j\right)}\sqrt{\left(\sum_{i=-\frac{M}{2}}^{i=\frac{M}{2}}\mathrm{Re}\left(Y_i\right)\cdot W_{ji}\right)^2+\left(\sum_{i=-\frac{M}{2}}^{i=\frac{M}{2}}\mathrm{Im}\left(Y_i\right)W_{ji}\right)^2}. \qquad (27)$$

Величина $R(\Delta r - \Delta r_j)$ определяет погрешность метода. Если функция $W(\omega)$ нормирована, то $R(\Delta r - \Delta r_j) \to 1$ при $\Delta r_j \to \Delta r$. Соответственно необходимо из набора эталонов W_j выбрать тот, который наиболее точно соответствует множеству Y. В качестве критерия точности соответствия выберем минимум выражения $|\Delta r - \Delta r_j|$. Очевидно, что чем меньше значение приведенного выражения, тем больше значение корреляционной функции $R(\Delta r - \Delta r_j)$ и вычисляемого модуля гармоники A_v.

Для случая, когда эталоны формируются достаточно часто и корреляционную функцию $R(\Delta r - \Delta r_j)$ можно считать равной 1, формулу (27) можно переписать в виде:

$$A_v = \sqrt{\left(\sum_{i=-\frac{M}{2}}^{i=\frac{M}{2}} \mathrm{Re}(Y_i)\cdot W_{ji}\right)^2 + \left(\sum_{i=-\frac{M}{2}}^{i=\frac{M}{2}} \mathrm{Im}(Y_i)\cdot W_{ji}\right)^2}. \qquad (28)$$

Наибольшее значение коэффициента корреляции показывает на пару «эталон – сигнал» и, соответственно, на величину отклонения δ от базовой точки. Частота сигнала определяется как разность значений K и δ.

В системе без шума все представленные выше методы не дают погрешности. Анализ работы методов был произведен при следующих параметрах: $f = 10{,}1$ и $N = 2048$.

Рассмотрим как работают представленные выше методы в системе с шумом при следующих параметрах: $f = 10{,}1$ и $N = 2048$.

На рисунке 3 изображены графики зависимостей средней погрешности определения частоты от SNR (соотношение «сигнал – шум»). Параметр SNR берется с шагом 5 дБ. Под средней погрешностью в данном случае понимается абсолютное значение разности истинной частоты от частоты, полученной расчетным путем. Для каждого значения SNR вычисляется среднее смещение. Среднее значение смещения вычисляется из 100 величин модуля смещения.

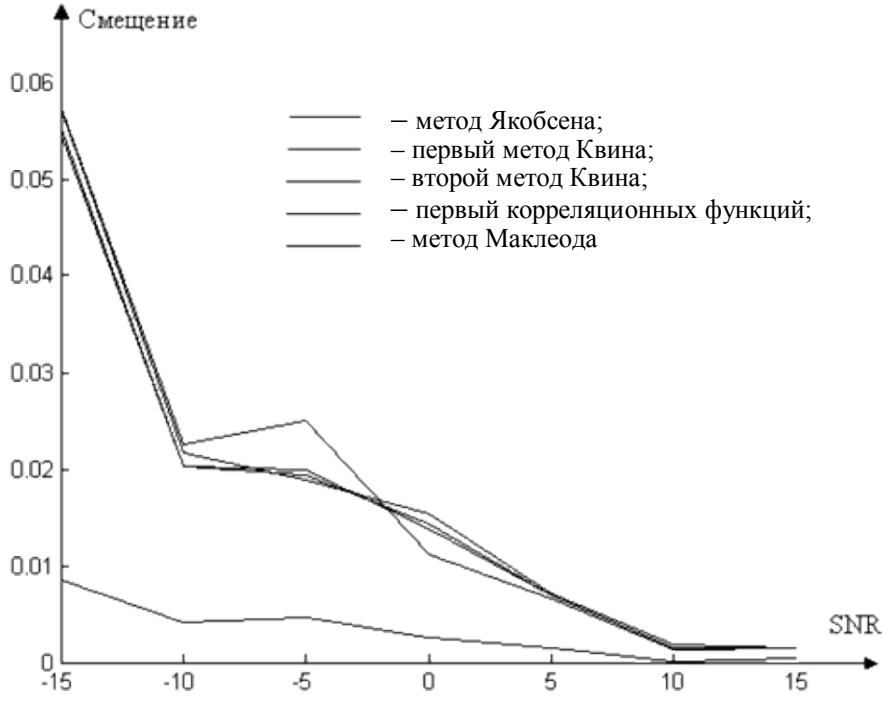


Рисунок 3 – Графики зависимостей смещения от SNR

Метод корреляционных функций показал наилучшие результаты в отличие от остальных методов на протяжении всего диапазона SNR. На рисунке 3 не отражен диапазон от минус 30 до минус 15 дБ, где другие методы имеют значительное смещение и не вписываются в данный график в отличие от метода корреляционных функций. Если сравнивать оставшиеся четыре метода, то можно отметить хорошие результаты у второго метода Квина и метода Маклеода. Однако преимуществом у метода Маклеода является относительная простота в реализации в отличие от метода Квина.

Результаты работы по определению вычислительной сложности для каждого метода представлены в таблице.

Вычислительная сложность рассматриваемых методов

Вычислительные операции	Методы определения				
	Якобсена	Квина (первый способ)	Квина (второй способ)	Маклеода	корреляционных функций
Операция умножения	1	0	10	6	14
Операция деления	1	3	6	2	0
Квадратный корень	0	0	0	1	1
Логарифм	0	0	2	0	0
Сравнение значений	0	1	0	0	2
Операция сложения (вычитания)	3	1	12	5	12

В таблице представлено число операций для вычисления одного значения δ. Для метода корреляционных функций результирующее число операций зависит от значения шага h (чем меньше значение h, тем больше вычислительная сложность алгоритма), т. е. число операций из таблицы нужно умножить еще на параметр $1/h$. В таблице не учтены затраты на построение набора эталонов. Как видно из данных таблицы, наибольшую вычислительную сложность имеет метод корреляционных функций.

В статье рассмотрены методы оценки частоты по дискретизированной выборке сигнала. При малом уровне шумов (от 10 дБ) все методы показали относительно высокую точность. Учитывая высокую вычислительную сложность метода корреляционных функций, в данном случае предпочтительней применять интерполяционные методы. При повышении уровня шума погрешность интерполяционных методов значительно возрастает, и на определенном уровне они перестают работать. В этом случае необходимо применять метод корреляционных функций.

Список литературы

1. Грицутенко, С. С. Повышение достоверности измерения показателей качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения: дис… канд. техн. наук / С. С. Грицутенко– Омск, 2007. – 154 с.

2. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б. Сергиенко. СПб: Питер, 2002. – 608 с.

3. Quinn, B. G. Estimation of frequency, amplitude and phase from the DFT of a time series // IEEE Trans. Signal Processing / B. G. Quinn // Vol. 45/ – no. 3/ 1997. – P. 814 – 817.

4. Jain, V. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT / V. Jain, W. Collins, D. Davis // IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. IM-28. – 1979. – P. 113 – 122.

5. Macleod, M. Fast nearly ML estimation of the parameters of real or complex single tones or resolved multiple tones / M. Macleod // IEEE Trans. Signal Processing. Vol. 46, №. 1. – 1998. – P. 141 – 148.

6. Quinn, B. G. Estimating frequency by interpolation using Fourier coefficients / B. G. Quinn // IEEE Trans. Signal Processing. Vol. 42, №. 5, 1994. – P. 1264 – 1268.

УДК 656.259.12

Е. М. Тарасов

ПРИНЦИП МНОГОКАНАЛЬНОСТИ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЙ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

В статье обоснована необходимость использования в инвариантных системах принципа многоканальности для реализации классификаторов состояния рельсовых линий. Разработана обобщенная структурная схема инвариантного классификатора состояний рельсовой линии, построенного по принципу двухканальности.

Необходимый признак реализуемости абсолютно инвариантных систем можно формулировать в форме принципа многоканальности (двухканальности): необходимым (но недостаточным) признаком осуществимости абсолютно инвариантной системы является наличие в схеме по меньшей мере двух каналов передачи возмущающего воздействия между точкой приложения возмущающего воздействия и выходным сигналом системы, для которого достигается инвариантность [1, 2].

При этом следует отметить, что принцип многоканальности не заменяет собой необходимых и достаточных условий физической реализуемости абсолютно инвариантных классификаторов состояний рельсовых линий (РЛ), но он является основным положением, которым следует руководствоваться при выборе рациональной структуры абсолютно инвариантных классификаторов состояний рельсовых линий (КСРЛ). Для практической реализации таких КСРЛ этот принцип имеет существенное значение.

Если положить все возмущения кроме $g_i(t)$ равными нулю, то выражение для передаточной функции $W(p)$ между точкой приложения воздействия $g_i(t)$ и выходом РЛ $u_2(t)$ можно записать в виде:

$$W(p)=\frac{U_2(p)}{G_i(p)}=\frac{A_{ij}(p)}{\Delta(p)}, \qquad (1)$$

где $U_2(p)$ и $G_i(p)$ - изображения по Лапласу величин $u_2(t)$ и $g_i(t)$;

$\Delta(p)$ и $A_{ij}(p)$ – главный определитель системы, преобразованной по Лапласу, и его алгебраическое дополнение, соответствующее элементу a_{ij}.

Для состояния рельсовой линии на основании выражения (1) можно записать, например, для $u_2(t)$ и возмущения $g_i(t)$ следующее соотношение, получаемое после перехода к изображению по Лапласу:

$$U_2(p)=\frac{A_{ij}(p)}{\Delta(p)}G_i(p). \qquad (2)$$

Условие абсолютной инвариантности сигнала $u_2(t)$ относительно возмущения $g_i(t)$ эквивалентно приравниванию к нулю передаточной функции $W(p)$:

$$W(p)=0.$$

Это может быть выполнено в случае, если функцию W(p) можно представить в виде разности по меньшей мере двух передаточных функций:

$$W_{g_i x_j}(p) = W^1_{g_i x_j}(p) - W^2_{g_i x_j}(p), \tag{3}$$

где $W^1_{g_i x_j}$ и $W^2_{g_i x_j}$ – передаточная функция первого (основного) и второго (компенсирующего) каналов.

Таким образом, $W_{g_i x_j}(p)$ должна представлять собой передаточную функцию параллельного соединения двух (или более) динамических звеньев или участков системы. Из выражения (3) получаем условие инвариантности в виде:

$$W^1_{g_i x_j}(p) = W^2_{g_i x_j}(p). \tag{4}$$

Как и систему автоматического регулирования, КСРЛ удобно описывать, рассматривая передаточные функции ее звеньев и КСРЛ в целом.

После перехода к изображениям по Лапласу согласно уравнению (2) находим

$$\begin{cases} U^1_2(p)=\dfrac{1}{\Delta(p)}\sum\limits_{i=1}^{n} A_{i1}(p)G_i(p); \\ U^2_2(p)=\dfrac{1}{\Delta(p)}\sum\limits_{i=1}^{n} A_{i2}(p)G_i(p); \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ U^n_2(p)=\dfrac{1}{\Delta(p)}\sum\limits_{i=1}^{n} A_{in}(p)G_i(p). \end{cases} \tag{5}$$

Так как согласно выражению (1) $\dfrac{A_{ij}(p)}{\Delta(p)} = W_{ij}(p)$, то

$$\begin{cases} U^1_2(p)=W^1_1(p)U_1(p)+W^1_{g2}(p)F_2(p)+\dots+W^1_{gn}(p)F_n(p); \\ U^2_2(p)=W^2_1(p)U_1(p)+W^2_{g2}(p)F_2(p)+\dots+W^2_{gn}(p)F_n(p); \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ U^n_2(p)=W^n_1(p)U_1(p)+W^n_{g2}(p)F_2(p)+\dots+W^n_{gn}(p)F_n(p), \end{cases} \tag{6}$$

где $F_i(p) = U_i(p)$;

$U^1_2(p), U^2_2(p)$ – напряжение на выходе РЛ первого канала (индекс 1) и второго канала (индекс 2).

Каждое уравнение системы (6) может описывать канал передачи информации в КСРЛ. Величина $W_j^i(p)$ есть передаточная функция i-го канала по j-му входному воздействию (входному сигналу $u_1(t)$ или возмущению $g_i(t)$).

Условие абсолютной инвариантности выполняется при решении системы уравнений (6) относительно входной величины $u_1(t)$, при котором исключается зависимость $u_2(t)$ от влияния возмущений $g_2(t)$, $g_3(t)$,…, $g_n(t)$. Так, например, при наличии только одного возмущения *g(t)* соответствующая система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} U^1_2(p)=W^1_1U_1(p)+W^1_g(p)G(p); \\ U^2_2(p)=W^2_1U_1(p)+W^2_g(p)G(p), \end{cases} \tag{7}$$

где $W^1_1(p)$, $W^2_1(p)$ – передаточные функции каналов по входному сигналу;

$W_g^1(p)$, $W_g^2(p)$ – передаточные функции каналов по возмущению;

$G(p)$ – изображение по Лапласу возмущения g(t).

Умножив обе части первого уравнения системы (7) на $W_g^2(p)$, а второго – на $W_g^1(p)$, получим:

$$\begin{cases} W_g^2(p)U_2^1(p)=W_g^2(p)W_1^1(p)U_1(p)+W_g^2(p)W_g^1(p)G(p); \\ W_g^1(p)U_2^2(p)=W_g^1(p)W_1^2(p)U_1(p)+W_g^1(p)W_g(p)G(p). \end{cases} \quad (8)$$

Рассматривая функцию

$$X\left[U_2^1(p), U_2^2(p)\right] = W_g^2(p)U_1^2(p) - W_g^1 U_1^1(p),$$

видим, что она не содержит информации о возмущающем воздействии. При этом инвариантность $X[U_2^1(p), U_2^2(p)]$ к возмущению $G(p)$ достигается при равенстве передаточных функций $W_g^1(p)$, $W_g^2(p)$ каналов по возмущению, т. е. при равенстве нулю передаточной функции устройства по данному возмущению.

Рельсовая линия представляется схемой замещения, содержащей продольные индуктивности и поперечные емкости, и обладает инерционностью как по отношению к входному сигналу $u_1(t)$, так и по возмущающим воздействиям $f(t)$, которые имеют, как правило, низкочастотный спектр, что позволяет вместо дифференциальных уравнений, связывающих входную координату, возмущения и параметры КСРЛ, использовать алгебраические уравнения. При этом в системе линейных уравнений коэффициенты $a_{ij}(D) = m_{ij}(D)^2 + n_{ij}(D) + k_{ij} \approx k_{ij}$.

Передаточные функции $W_{g1}(p)$, $W_{g2}(p)$,…, $W_{gn}(p)$ каналов представляют собой при этом коэффициенты передачи.

В этом случае система уравнений (8) принимает вид:

$$\begin{cases} k_{11}u_1+k_{12}u_2'+...+k_{1,n-1}u_{n-1}'+k_{1n}u_n'=g_1; \\ k_{21}u_1+k_{22}u_2'+...+k_{2,n-1}u_{n-1}'+k_{2n}u_n'=g_2; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ k_{i1}u_1+k_{i2}u_2'+...+k_{i,n-1}u_{n-1}'+k_{in}u_n'=g_i; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ k_{n1}u_1+k_{n2}u_2'+...+k_{n,n-1}u_{n-1}'+k_{nn}u_n'=g_n, \end{cases} \quad (9)$$

а коэффициент передачи W(p), как следует из формулы (1), при p = 0 есть $W_j^i = W_j^i(0) = \dfrac{A_{ij}(0)}{\Delta(0)}$, где i и j – номера канала и возмущения; $A_{ij}(0)$, $\Delta(0)$ – значения величины $A_{ij}(p)$ и $\Delta(p)$ при p = 0.

В качестве каналов в инвариантных классификаторах состояний рельсовых линий могут использоваться не только два или несколько пространственных или временных канала, но также и несколько различных физических характеристик одной и той же рельсовой линии. В тех случаях, когда каналы КСРЛ совмещены в виде одной и той же рельсовой линии, практически достигаемая точность может быть существенно выше за счет отстранения от неидентичности каналов, если их идентичность необходима для достижения инвариантности.

Если на рельсовую линию воздействуют n распределенных вдоль нее возмущений g_1, g_2,…,g_n, то в систему должны быть включены n компенсационных каналов, на которые так-

же воздействуют распределенные возмущения. Так как возмущений n, то для исключения их влияния составляется n уравнений, описывающих компенсационные каналы, и полученная система решается относительно переменной u_2.:

$$\begin{cases} u_2^1 = F_1(u_{вх}, g_1, ..., g_n); \\ u_2^2 = F_2(u_{вх}, g_1, ..., g_n); \\ ..... \\ u_2^n = F_n(u_{вх}, g_1, ..., g_n), \end{cases} \quad (10)$$

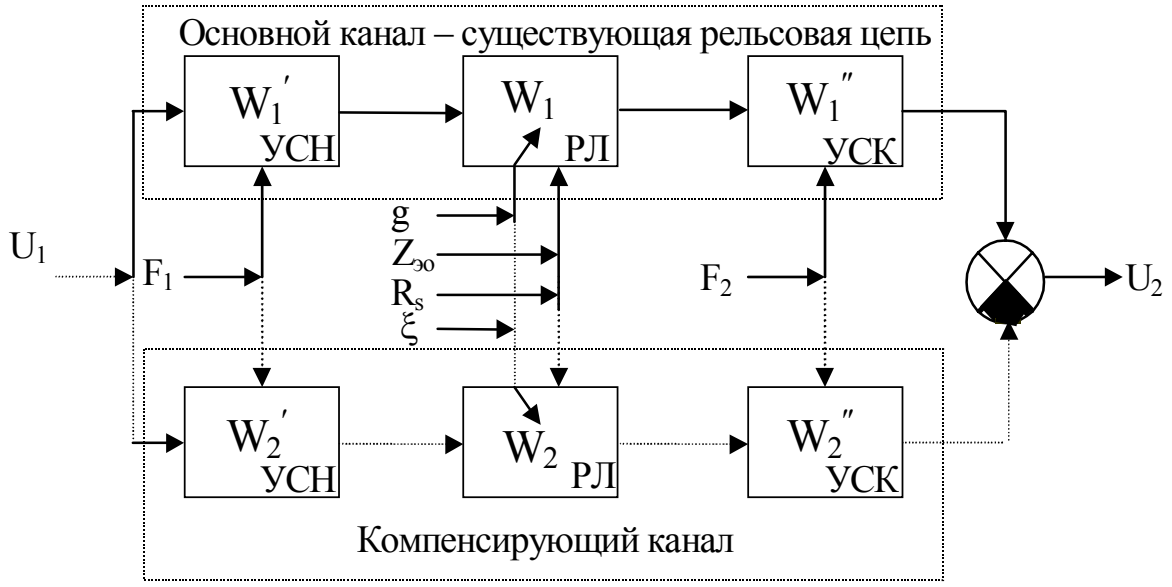
откуда следует, что $u_{вх} = F_0(u_2^1, u_2^2, ..., u_2^n)$, где g_1, g_2, …, g_n – возмущения, действующие на звенья КСРЛ; $u_2^1, u_2^2, ..., u_2^n$ – значения напряжений на выходе 1-го, 2-го и *n*-го каналов.

Основным условием возможности составления и решения системы (10) является наличие физически реализуемых каналов, описываемых соответствующими уравнениями. Такой метод достижения инвариантности, называемый также многопараметрическим методом [3], реализуется, например, в КСРЛ, представленной в источниках.

Существующие классификаторы состояний рельсовых линий являются одноканальными. Наличие только одного канала воздействия возмущения, согласно принципам инвариантности, свидетельствует о необходимости создания второго компенсирующего канала, т. е. если имеется естественный канал – рельсовая линия с передаточной функцией $W_{ij}^1(p)$, по которому внешнее возмущение $g_i(t)$ действует на выходной сигнал U_2, то должен существовать другой канал с передаточной функцией $W_{ij}^2(p)$, через который поступало бы компенсирующее воздействие такого же значения, но другого знака.

На рисунке представлена обобщенная структурная схема инвариантного классификатора состояний рельсовой линии, построенного по принципу двухканальности.

Инвариантный КСРЛ можно представить в виде следующих основных функциональных звеньев: рельсовая линия с передаточными функциями W_1 и W_2, преобразующая измеряемую величину R_S или $Z_{эо}$ в удобный для измерения выходной сигнал, и устройства согласования с передаточными функциями (W_1', W_1'' и W_2', W_2'').



Структурная схема инвариантного классификатора состояний рельсовой линии

На рисунках обозначено: R_S (шунт) или $Z_{эо}$ (обрыв рельсовой линии) – подлежащие измерению полезные воздействия, изменяющие параметры звеньев рельсовых многополюсников с передаточными функциями W_1, W_2 ; U_1 – входной сигнал источника питания рельсовой линии; g – проводимость изоляции; ξ – помеха; $F_1, F_2 = f(t°,\chi)$ – дестабилизирующие воздействия, действующие симметрично на оба канала; t° – температура, χ – влажность; U_2 – выходной сигнал классификатора, содержащий информацию о воздействии R_S или $Z_{эо}$, и инвариантный по отношению К дестабилизирующим воздействиям g, ξ и F_1, F_2; W_1' и W_1'' – передаточные функции элементов согласования основного канала в начале (УСН) и в конце (УСК) рельсовой линии, а W_2' и W_2'' – передаточные функции элементов согласования компенсирующего канала в начале и в конце рельсовой линии соответственно.

Условием абсолютной инвариантности выходного сигнала U_2 к возмущающим воздействиям g, F_1 и F_2 является равенство нулю передаточной функции системы по отношению к каждому воздействию, т. е.

$$\begin{cases} W_1 \cdot W_1'' - W_2 \cdot W_2'' = 0 \text{ (для g, } \varsigma); \\ W_1' \cdot W_1 \cdot W_1'' - W_2' \cdot W_2 \cdot W_2'' = 0 \text{ (для } F_1); \\ W_1'' - W_2'' = 0 \text{ (для } F_2). \end{cases} \quad (11)$$

или

$$\begin{cases} W_1 \cdot W_1'' \equiv W_2 \cdot W_2'' \text{ (для g, } \varsigma); \\ W_1' \cdot W_1 \cdot W_1'' \equiv W_2' \cdot W_2 \cdot W_2'' \text{ (для } F_1); \\ W_1'' \equiv W_2'' \text{ (для } F_2). \end{cases} \quad (12)$$

При построении инвариантного к проводимости изоляции КСРЛ по двухканальному принципу (см. рисунок 1) выполнение тождества $W_1'' \equiv W_2''$ не вызывает затруднений, так как всегда можно обеспечить симметрию воздействия возмущающих факторов (окружающей температуры, изменения питающих напряжений и т. п.) на устройства согласования.

Список литературы

1. Принципы инвариантности в измерительной технике. [Текст] / Б. Н. Петров, В. А. Викторов и др. – М.; Наука, 1976. – 243 с.

2. Тарасов, Е. М. Инвариантные системы контроля состояний рельсовых линий [Текст] / Е. М. Тарасов / СамГАПС – Самара,. 2002. – 134 с.

3. Принципы инвариантности в измерительной технике. [Текст] / Б. Н. Петров, В. А. Викторов и др. – М.: Наука. 1976. – 243 с.

УДК 621.3

В. В. Молчанов, В. Г. Шахов

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

В статье рассмотрены вопросы повышения эксплуатационной надежности подвижного состава железных дорог. Приведены результаты моделирования железнодорожного транспорта как конвейерной системы. Рассмотрена новая система оперативного контроля и диагностирования подвижного состава, отличающаяся повышенной гибкостью и мобильностью

В современных условиях требования к качеству и своевременности перевозок серьезно ужесточились. Развитие информационных технологий позволяет оперативно отслеживать движение грузов (пассажиров) в реальном времени, включая их отправление и прибытие на конечные пункты. Повсеместно распространены геоинформационные системы, позволяющие их клиентам определить собственное местонахождение в пределах земного шара.

Железнодорожный транспорт с точки зрения технической кибернетики относится к системам конвейерного типа, т. е. к системам с жесткой взаимозависимостью. Поясним это на практическом примере. Предположим, на анализируемом участке железной дороги присутствует несколько поездов, движущихся в одном направлении с заданным временным интервалом. Интенсивность движения оценивается количеством поездов, находящихся на участке длины L (нормативный интервал; чаще всего это тяговое плечо). Если один из участников движения остановился на рассматриваемом интервале, это приводит к тому, что все поезда за ним останавливаются. Это и есть главный признак конвейерной системы.

Авторами решалась задача работы конвейерной системы при различной интенсивности движения. Качество ремонта и эксплуатации подвижных единиц оценивается в функции возможных простоев поездов во время движения. Вводится определение удельной интенсивности перевозок:

$$C = \lim_{L\to\infty}\frac{m_i L}{T} = \lim_{L\to\infty}\frac{m_i L}{L/V_i} = m_i V_i, \qquad (1)$$

где L – общая длина рассматриваемого участка;

m_i – общая масса перевозимых грузов на этом участке;

T – время следования поезда по участку;

V_i – средняя скорость движения на участке.

Если в результате низкой надежности одной из единиц движения происходит временное его прекращение, удельная интенсивность снижается. Расчет зависимостей эффективности от разных факторов, учитывающих реальные поездные ситуации, проводился для нескольких вариантов движения.

Полученные зависимости можно представить в виде номограммы. При этом возможны два их варианта: зависимости удельной эффективности от количества поездов на рассматриваемом участке длины L при фиксированной технической скорости $V_{ст}$ (рисунок 1) и те же зависимости для разных скоростей движения (рисунок 2).

Из приведенных номограмм видно, что в обоих случаях удельная эффективность перевозок существенно зависит от длительности простоев, т. е. от надежности подвижного состава. Номограммы позволили определить фактические технические требования к параметрам диагностической системы.

Модели основаны на гипотезе дискретной модели отказа технической системы (объекта) при независимости отказов.

Фактически задача намного сложнее по ряду признаков.

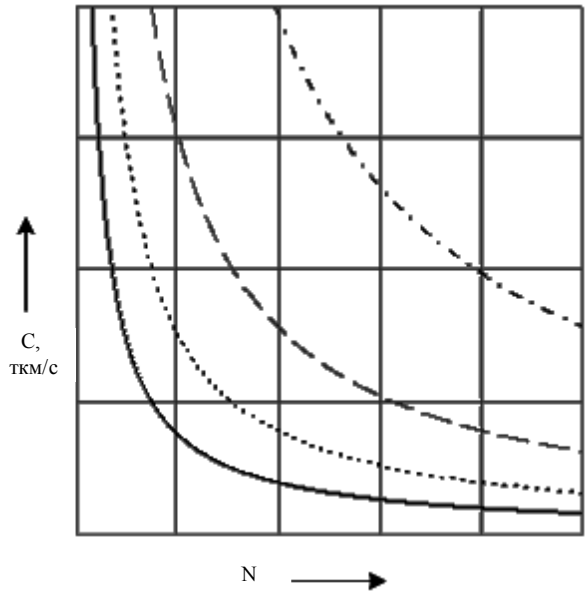


Рисунок 1 – Зависимости удельной эффективности от количества поездов на рассматриваемом участке длины L при технической скорости $V_{ст}$

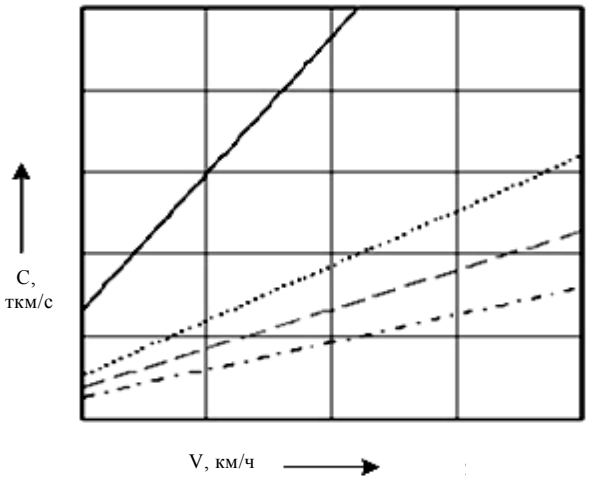


Рисунок 2 – Зависимости удельной эффективности от количества поездов на рассматриваемом участке длиной L для различных скоростей V

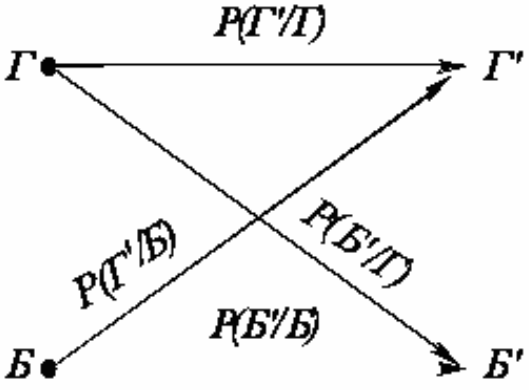


Рисунок 3 – Диаграмма результатов диагностирования

Все транспортные единицы в поезде не могут считаться независимыми, особенно в динамике. Например, значительное влияние на динамику движения поезда оказывает его формирование. Движение сухогрузных, а тем более пассажирских отличается от движения наливных вагонов. К сожалению, этот факт до сих пор не учитывается даже в плане формирования составов.

Каждая автономная транспортная единица представляет собой совокупность блоков (узлов), в принципе взаимозависимых. Учет этих факторов намного усложняет общую задачу по выражению (1), но возможно ее упрощение по следующим вариантам:

а) осуществление факторного анализа: учета особенностей отказа выделенного объекта на общий результат поездного движения;

б) усечение диапазона анализа по критерию значимости;

в) разработка адаптивных алгоритмов, основанных на приспосабливаемости алгоритмов и критериев оценивания при испытаниях конкретных объектов испытаний.

Достоверность диагностирования – степень объективного соответствия результатов диагностирования действительному техническому состоянию объекта [1]. Она может оцениваться вероятностью правильного диагноза или ошибкой. Для такой оценки используется диаграмма результатов диагностирования, приведенная на рисунке 3, гдеобозначено: $Г$, $Б$ – исходное состояние диагностируемого объекта (исправен или неисправен); $Г'$, $Б'$ – вывод о состоянии объекта после диагностического эксперимента.

Как видно из диаграммы на рисунке 3, возможны четыре типа решения:

исходно (априорно) исправный объект после испытаний признается исправным с вероятностью $P\left(Г'/Г\right)$;

априорно неисправный объект после испытаний подтверждает свое состояние с вероятностью $P\left(Б'/Б\right)$;

исправный объект после экспериментов ошибочно признается неисправным с вероятностью $P\left(Б'/Г\right)$;

неисправный объект после диагностирования ошибочно принимается годным с вероятностью $P\left(Г'/Б\right)$.

Первые два решения правильны, два другие – ошибка. По аналогии с теорией связи решение об исправности объекта при его фактической неисправности назовем ошибкой I рода:

$$P_I = P\left(Г'/Б\right). \tag{2}$$

Решение противоположного характера назовем ошибкой II рода:

$$P_{II} = P\left(Б'/Г\right). \tag{3}$$

Будем считать, что состояние «исправен – неисправен» образует полную группу событий:

$$P\left(Г\right) + P\left(Б\right) = 1. \tag{4}$$

Значит, справедливы и следующие соотношения:

$$P\left(Г'/Г\right) + P\left(Б'/Г\right) = P\left(Г\right); \tag{5}$$

$$P\left(Б'/Б\right) + P\left(Г'/Б\right) = P\left(Б\right); \tag{6}$$

$$P\left(Г'/Г\right) + P\left(Г'/Б\right) = P\left(Г'\right); \tag{7}$$

$$P\left(Б'/Б\right) + P\left(Б'/Г\right) = P\left(Б'\right). \tag{8}$$

Исходя из соотношений (5) – (8) можно описать математическое ожидание диагностического эксперимента относительно объекта в виде:

$$P_Д = \left[P\left(Г'/Г\right) + P\left(Б'/Г\right)\right]P\left(Г\right) + \left[P\left(Б'/Б\right) + P\left(Г'/Б\right)\right]P\left(Б\right) \tag{9}$$

и относительно результатов диагностирования:

$$P'_Д = \left[P\left(Г'/Г\right) + P\left(Г'/Б\right)\right]P\left(Г'\right) + \left[P\left(Б'/Б\right) + P\left(Б'/Г\right)\right]P\left(Б'\right). \tag{10}$$

При отсутствии ошибок выражения (4) – (9) преобразуются к виду:

$$P(Г'/Г) = P(Г) = P(Г'); \tag{11}$$

$$P\left(Б'/Б\right) = P\left(Б\right) = P\left(Б'\right); \tag{12}$$

$$P_Д = P'_Д = P\left(Г\right) + P\left(Б\right) = 1. \tag{13}$$

Выражение в (13) означает, что диагностический эксперимент абсолютно достоверен и адекватно отображает состояние объекта.

Для обеспечения количественной оценки качества диагностирования авторами предложены коэффициенты качества:

$$л_1 = P\left(Б/Г\right)/P\left(Г/Г\right); \tag{14}$$

$$л_2 = P\left(Г/Б\right)/P\left(Б/Б\right). \tag{15}$$

На рисунке 4 приведены номограммы коэффициентов качества для модели потока отказов в виде распределения Релея для различных дисперсий σ. Обратим внимание на то, что зависимости имеют явно выраженные экстремумы. Согласно кривым на рисунке 4 повышение качества контроля возможно при снижении интервалов между проверками $\tau_Р$ (правые части графиков можно считать нерабочими).

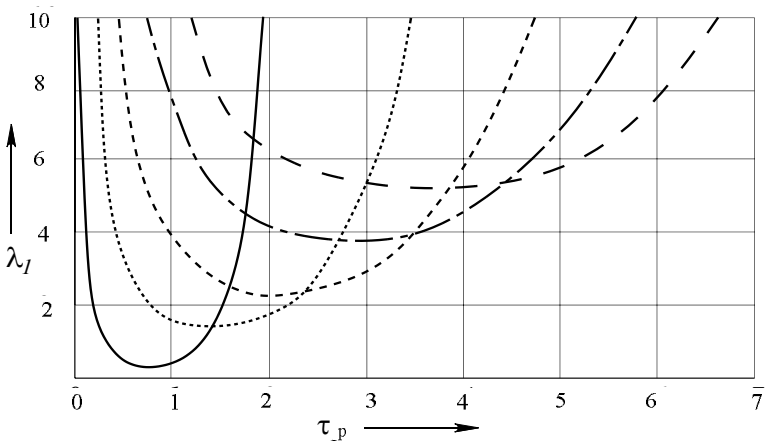


Рисунок 4 – Номограммы качества (распределение Релея):

—— – $\sigma = 1$; ····· – $\sigma = 2$; - - - - - – $\sigma = 3$; — - — – $\sigma = 4$; — — – $\sigma = 5$

Существуют определенная иерархия и технологическое обеспечение поддержания надежности поездов. Первое поколение оборудования комплексной проверки надежности требовало его испытаний на специализированных стендах [1].

Второй уровень систем диагностирования основан на новом технологическом оборудовании и новых методиках испытаний. В качестве оборудования использовались стационарные или носимые персональные компьютеры [2]. Оборудование и соответствующие технологии позволили обеспечить качественно новый уровень состояния подвижных единиц.

Третье поколение систем контроля и диагностики выполняется на основе нового поколения персональных компьютеров – так называемых носимых, или карманных, компьютеров. Современные компьютерные технологии позволили освоить массовый выпуск карманных компьютеров, по своим характеристикам не уступающих ноутбукам с хорошим интерфейсом и оригинальной операционной системой, не уступающей ОС Windows. Кроме того, фирма Apple, разработавшая эту операционную систему, выпустила огромное количество прикладных программ как бесплатных, так и продающихся по невысокой цене (например, меньше доллара). Программы доступны в Интернете и охватывают широкий спектр задач, от развлекательного до профессионального назначения. Это и составляет технологии XXI в.

Предприятие ОМИКС (г. Омск) освоило серию контрольно-диагностических и измерительных модулей, которые могут использоваться в различных отраслях транспорта, промышленности, в строительстве и коммунальном хозяйстве. Основные составляющие модуля – это справочно-информационная система на базе карманного компьютера, измерительные модули и комплект интерфейсных блоков. Последние рассчитаны на УКВ-диапазон и могут обеспечить как ближнюю связь, так и выход на спутники или в корпоративные сети. Часть внешнего оборудования изготавливается предприятием самостоятельно, часть комплектуется из покупных изделий. Такая архитектура упрощает проектирование модулей под конкретные объекты и заметно удешевляет их. Так, по сравнению с системами второго поколения стоимость комплекса снижается по крайней мере втрое.

Возможности разработанной системы достаточно велики. К измерительному блоку через стандартный интерфейс можно присоединять датчики под различные физические величины (весь электрический ряд; линейные размеры и перемещения, включая вращения; давление, температуру, электрические, магнитные и электромагнитные поля и т. д.). Добавим к этому, что системный блок имеет встроенную цифровую камеру с высоким разрешением, поэтому с его помощью оператор может фиксировать диагностируемые объекты по их номерам, которые после фотографирования заносятся в базы данных.

Разработчиками созданы контрольно-диагностические комплексы для различных приложений, в том числе для локомотивов. Например, доведены до сдачи «под ключ» системы контроля топливной аппаратуры дизелей, для электроаппаратного цеха, контроля силового

коммутационного оборудования, электрических машин (тяговые двигатели, вспомогательные машины), буксовых узлов, электрооборудования пассажирских вагонов, поршневой системы дизелей и т. д. Другие технические приложения могут реализовываться на той же основе с привязкой к объектам.

Разработан комплекс стационарных модулей, обеспечивющих авторизацию пользователей и протоколирующий действия операторов в специальной базе данных.

Комплексы имеют избыточность по ресурсам, производительности, памяти, количеству контролируемых величин, возможностям связи с другими информационными системами, что обеспечивает качественно новый подход к контролю и диагностированию, а также к интегрированию таких систем в общемировую информационную сеть.

Список литературы

1. Техническая диагностика и надежность железнодорожной техники: Монография [Текст] / В. В.Молчанов, В. Г.Шахов и др. – М.: Спутник +, 2006. – 197 с.

2. Головаш, А. Н. Комплексная система обслуживания железнодорожной техники. [Текст] / А. Н. Головаш, П. Н. Рубежанский, В. Г. Шахов // Технология машиностроения. 2007, – № 8.

УДК 620.9:005.93:502.174

М. М. Никифоров

КОНЦЕПЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ОАО «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»

В статье предложена концепция выполнения в ОАО «Российские железные дороги» требований Федерального закона РФ № 261 от 23.11.2009 г. в части проведения обязательного энергетического обследования и разработки целевой программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Основанием для проведения работ по энергетическому обследованию ОАО «Российские железные дороги» является реализация ст. 16 Федерального закона № 261 от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», согласно которой обязательное энергетическое обследование должно быть выполнено во всех организациях, осуществляющих регулируемые виды деятельности.

В соответствии с п. 2 ст. 16 ФЗ-261 проведение обязательного энергетического обследования ОАО «Российские железные дороги» должно быть завершено в период со дня вступления в силу ФЗ-261 до 31 декабря 2012 г., последующие энергетические обследования – не реже чем один раз каждые пять лет.

В соответствии с п. 1 ст. 25 ФЗ-261 организации с участием государства или муниципального образования и организации, осуществляющие регулируемые виды деятельности, должны утверждать и реализовывать программы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Это обусловливает необходимость разработки по результатам энергетического обследования соответствующей программы в ОАО «Российские железные дороги» и последующего ее внедрения.

Целью проведения энергетического обследования является повышение эффективности использования и снижение потерь топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) посредством разработки и внедрения программы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Проведение энергетического обследования позволяет решить следующий комплекс задач:

1) получение объективных данных об объеме используемых энергетических ресурсов;

2) определение показателей энергетической эффективности;

3) определение потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности;

4) разработка перечня типовых, общедоступных мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности и проведение их стоимостной оценки.

При организации и проведении энергетического обследования необходимо учитывать проходящее в настоящее время в ОАО «Российские железные дороги» структурное реформирование, в рамках которого выделяются специализированные по видам деятельности вертикально интегрированные структуры (дирекции), которые в дальнейшем должны войти в холдинговую компанию «Российские железные дороги» в качестве дочерних (зависимых) акционерных обществ.

Структура проведения энергетического обследования подразделений ОАО «Российские железные дороги», а также его дочерних и зависимых обществ приведена на рисунке .

Для упорядочивания работ по энергетическому обследованию ОАО «Российские железные дороги» и его дочерних (зависимых) обществ все структурные подразделения разделяются на три категории в соответствии с уровнем потребления энергоресурсов, степенью влияния их производственных процессов на энергопотребление, а также с учетом количества и степени территориальной распределенности объектов, входящих в указанные структурные подразделения.

К первой категории относятся структурные подразделения дирекции тяги, департамента электрификации и электроснабжения, а также наиболее энергоемкие структурные подразделения, имеющие значительное количество объектов (цехов, отделений, производственных участков и прочих служебно-бытовых помещений), расположенных в границах железнодорожных узлов, для которых существует возможность определения удельного расхода энергоресурсов на выпуск единицы продукции по основным цехам и участкам. К первой категории могут быть отнесены также структурные подразделения инфраструктуры железных дорог, характеризующиеся значительным энергопотреблением, объекты которых территориально расположены вдоль железнодорожного пути, вне зависимости от возможности определения удельного расхода энергоресурсов на выпуск единицы продукции по основным цехам и участкам.

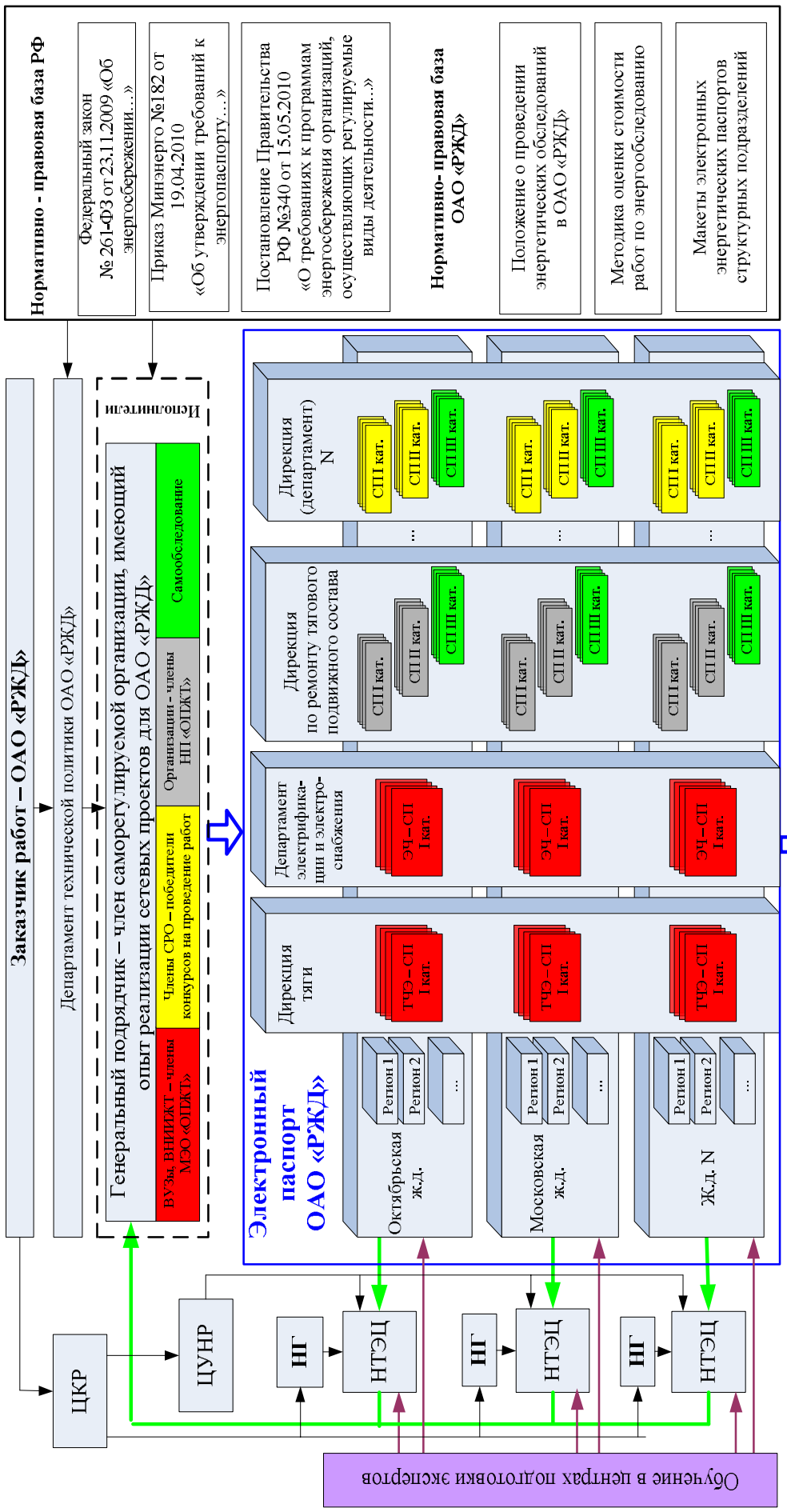
Ко второй категории относятся энергоемкие филиалы структурных подразделений первой категории, расположенные в границах железнодорожных узлов, для которых существует возможность определения удельного расхода энергоресурсов на выпуск единицы продукции по основным цехам и участкам, и структурные подразделения инфраструктуры железных дорог, объекты которых территориально расположены вдоль железнодорожного пути, характеризующиеся средним уровнем энергопотребления.

К третьей категории относятся остальные структурные подразделения (характеризующиеся незначительным энергопотреблением), а также территориальные филиалы структурных подразделений первой категории с малой энергоемкостью.

В соответствии с требованиями Федерального закона № 261 от 23 ноября 2009 г. деятельность по проведению энергетического обследования вправе осуществлять только лица, являющиеся членами саморегулируемых организаций в области энергетического обследования.

Создание и функционирование саморегулируемых организаций в области энергетического обследования должны осуществляться в соответствии с требованиями Федерального закона от 1 декабря 2007 г. № 315-ФЗ «О саморегулируемых организациях».

Организацию работ по проведению энергетического обследования в ОАО «РЖД» выполняет генеральный подрядчик, отвечающий требованиям, предъявляемым к организациям-энергоаудиторам, и имеющий опыт реализации» проектов сетевого значения в интересах ОАО «РЖД.



Структура проведения энергетического обследования в ОАО «Российские железные дороги»

К работам по энергетическому обследованию структурных подразделений объектов первой и второй категории привлекаются аттестованные компании-энергоаудиторы (члены СРО).

В результате обследования каждого структурного подразделения должен быть составлен энергетический паспорт, соответствующий требованиям приказа Минэнерго №182 от 19.04.2010 «Об утверждении требований к энергопаспорту…», и должна быть разработана программа в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности обследованного структурного подразделения в соответствии с постановлением Правительства РФ №340 от 15.05.2010 «О требованиях к программам энергосбережения организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности...», основанная на типовой программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности для данного типа структурных подразделений, учитывающей особенности установленного оборудования и технологических схем конкретных предприятий. При разработке рабочих программ и проведении энергообследований в целях сокращения времени и затрат должна использоваться действующая в отрасли система нормирования и анализа показателей использования ТЭР.

Для обеспечения учета специфики деятельности отдельных хозяйств ОАО «Российские железные дороги» к организациям-энергоаудиторам, претендующим на выполнение их обследований, предъявляются дополнительные требования.

При обследовании структурных подразделений, относящихся к дирекции тяги и департаменту электрификации и электроснабжения, преимущественное право выполнения работ предоставляется энергоаудиторам, представляющим отраслевую науку и имеющим опыт проведения аналогичных работ.

При обследовании структурных подразделений, относящихся к дирекциям по ремонту подвижного состава, преимущественное право выполнения работ отдается энергоаудиторам, представляющим организации – производители железнодорожной техники (ОПЖТ), осуществляющим изготовление соответствующих типов подвижного состава.

Право проведения энергетического обследования прочих структурных подразделений первой и второй категории предоставляется на общих основаниях без предъявления дополнительных требований.

Заполнение энергетических паспортов для структурных подразделений третьей категории выполняется силами обученных сотрудников указанных подразделений под контролем представителей дорожных топливно-энергетических центров.

Генеральный подрядчик осуществляет

подбор исполнителей в соответствии с указанными выше требованиями и контроль качества выполняемых ими работ;

заполнение электронного энергетического паспорта ОАО «РЖД» по данным энергетических паспортов, разработанных организациями-исполнителями, а также составленных сотрудниками структурных подразделений третьей категории;

обобщение и анализ результатов энергетического обследования структурных подразделений в границах железнодорожных узлов, железных дорог, субъектов Российской Федерации, вертикально-интегрированных структур холдинговой компании ОАО «РЖД»;

разработку комплексной программы повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в ОАО «РЖД».

В соответствии с п. 8 ст. 18 ФЗ-261 «Члены саморегулируемой организации в области энергетического обследования – юридические лица и индивидуальные предприниматели – вправе проводить энергетические обследования в отношении самих себя и принадлежащих им объектов».

Для выполнения требований создаваемой саморегулируемой организации по подготовке специалистов ОАО «Российские железные дороги» в области проведения энергетического обследования и обеспечения требуемого качества проведения работ на базе Московского го-

сударственного университета путей сообщения и Омского государственного университета путей сообщения необходимо создать сертифицированные центры подготовки экспертов по проведению энергетического обследования и энергетической паспортизации.

В настоящее время Омский государственный университет путей сообщения получил сертификат соответствия требованиям системы, предъявляемым к учебно-методическим центрам в системе РИЭР.

В указанных центрах необходимо организовать обучение сотрудников дорожных топливно-энергетических центров и структурных подразделений ОАО «Российские железные дороги», которые впоследствии должны будут принимать участие в первичном и повторных обязательных энергетических обследованиях структурных подразделений третьей категории.

Сопровождение работ по энергетическому обследованию в границах железных дорог – территориальных филиалов ОАО «Российские железные дороги» должно осуществляться дорожными топливно-энергетическими центрами.

В функции дорожных топливно-энергетических центров в области сопровождения энергетических обследований должны войти:

разработка предложений по очередности проведения энергетического обследования структурных подразделений в границах железной дороги – территориального филиала холдинговой компании «Российские железные дороги» – с учетом их принадлежности к вертикально интегрированным структурам холдинговой компании «Российские железные дороги»;

участие в работе конкурсных комиссий по определению победителей конкурсов на проведение энергетического обследования;

согласование допуска представителей организаций-энергоаудиторов на объекты структурных подразделений и предоставления им беспрепятственного доступа к информации, характеризующей потребление топливно-энергетических ресурсов, в том числе имеющих гриф «коммерческая тайна»;

организация и контроль качества работ по составлению энергетических паспортов структурных подразделений железных дорог, отнесенных к третьей категории, с последующей передачей указанных паспортов генеральному подрядчику, координирующему проведение энергетического обследования ОАО «РЖД»;

участие в работе комиссий по приемке результатов энергетического обследования структурных подразделений;

участие в рабочих группах по разработке комплексных программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений.

К участию в комиссиях по приемке результатов энергетического обследования должны привлекаться также специалисты отраслевой науки и вузов, обладающие соответствующими знаниями и опытом работ в области проведения энергетического обследования.

С целью повышения качества составления программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений к участию в заседаниях рабочих групп по их разработке должны привлекаться специалисты отраслевой науки и вузов, а также представители организаций – производителей энергосберегающего оборудования.

В соответствии со ст. 18 ФЗ-261 гарантом качества проводимого энергетического обследования выступает саморегулируемая организация, членом которой является организация-энергоаудитор, выполняющая обследование.

Качество проведения энергетического обследования проверяется при приемке энергетического паспорта комиссией в составе:

начальника и главного инженера (главного энергетика) структурного подразделения, в котором проводилось энергетическое обследование;

представителей организации-энергоаудитора, выполнявшего проведение энергетического обследования, в том числе по направлениям проведения работ: электрик, теплотехник, технолог;

представителя(ей) дорожного топливно-энергетического центра, на подведомственной территории которого расположено структурное подразделение;

приглашенных представителей отраслевой науки и вузов, обладающих соответствующими знаниями и опытом работ в области проведения энергетических обследований и повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

По результатам работы комиссии составляется протокол о приемке энергетического паспорта структурного подразделения или о необходимости его доработки.

По результатам энергетического обследования структурных подразделений холдинговой компании «Российские железные дороги» необходимо провести анализ разработанных рекомендаций, направленных на повышение эффективности использования и снижения потерь ТЭР.

Анализ технических мероприятий должен проводиться в направлении от ресурса, имеющего наибольший вес в суммарном энергопотреблении. Внедрение этих мероприятий, как правило, может дать наиболее значительный эффект как в натуральном, так и в денежном выражении.

По каждому ресурсу должен быть определен энергосберегающий потенциал, т. е. границы возможного снижения расхода условного топлива в годовом разрезе.

Величина энергосберегающего потенциала в пересчете на условное топливо соответствует превышению фактических удельных расходов над номинальными удельными расходами. Номинальные удельные расходы топлива определяются по энергетическим характеристикам оборудования.

Приоритет технических мероприятий должен выстраиваться в соответствии с энергосберегающим потенциалом, сроками и стоимостью реализации соответствующих мероприятий.

Сравнение опыта различных организаций энергоаудиторов позволит разработать для каждого вида структурных подразделений типовые предложения по повышению эффективности использования и снижения потерь топливно энергетических ресурсов.

Для оценки потенциала энергосбережения по вертикально-интегрированным структурам холдинговой компании «Российские железные дороги» на основании энергетических паспортов соответствующих структурных подразделений должны быть составлены сводные энергетические паспорта для вертикально-интегрированных структур.

Кроме того, должна быть выполнена работа по составлению энергетических паспортов и формированию программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД» и их территориальных филиалов в границах субъектов Российской Федерации.

Выполнение данных работ обеспечивает генеральный подрядчик, входящий в состав саморегулируемой организации и имеющий право проведения энергетических обследований с привлечением отраслевой науки и вузов. Полученные сводные энергетические паспорта должны быть согласованы в соответствующих вертикально-интегрированных структурах, управлении планирования и нормирования материально-технических ресурсов, департаменте технической политики ОАО «Российские железные дороги».

На основании сводных энергетических паспортов должны быть разработаны программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений вертикально-интегрированных структур холдинговой компании «Российские железные дороги».

В разработке программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности для вертикально интегрированных структур должны принимать участие представители

соответствующей вертикально интегрированной структуры холдинговой компании «Российские железные дороги»;

департамента технической политики ОАО «Российские железные дороги»;

управления планирования и нормирования материально-технических ресурсов ОАО «Российские железные дороги»;

ЗАО «Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий» как организации, являющейся генеральным подрядчиком инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте»;

ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», являющегося головным разработчиком энергетической стратегии холдинговой компании «Российские железные дороги»;

отраслевых вузов, обладающие соответствующими знаниями и опытом работ в области проведения энергетических обследований и повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

Разработанные программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности вертикально интегрированных структур согласовываются

в причастных департаментах холдинговой компании «Российские железные дороги»;

департаменте технической политики ОАО «Российские железные дороги»;

управлении планирования и нормирования материально-технических ресурсов ОАО «Российские железные дороги»;

финансовых и бюджетных департаментах ОАО «Российские железные дороги».

Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности утверждается распоряжением президента или старшего вице-президента холдинговой компании «Российские железные дороги».

Типовые предложения по повышению эффективности использования и снижения потерь топливно-энергетических ресурсов, входящие в программы энергосбережения, должны опираться на банк данных типовых проектных решений по наукоемким ресурсосберегающим технологиям, прошедших апробацию в рамках инвестиционного проекта ОАО «РЖД» «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте».

Для оперативного управления комплексным энергетическим обследованием структурных подразделений холдинговой компании «Российские железные дороги» необходимо создание автоматизированной информационной базы данных, отражающей результаты энергообследований.

База данных должна содержать отчет по энергетическому обследованию, результаты инструментальных измерений, топливно-энергетический баланс, энергетический паспорт, рекомендации по повышению эффективности использования энергоресурсов, перечень мероприятий по утвержденной программе энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Информация базы данных должна быть распределена по трем уровням: уровень ОАО «РЖД», уровень вертикально-интегрированных структур, уровень структурных подразделений.

Программные модули базы данных должны обеспечивать мониторинг проведения работ по энергообследованию (заключение контрактов, предоставление отчетов), контроль выполнения утвержденных программ по энергосбережению и повышению энергетической эффективности вертикально интегрированных структур, сравнительный анализ технико-экономических показателей структурных подразделений.

УДК 621:658.5

Ю. А. Усманов, Ю. В. Булахова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕНЕДЖМЕНТА ОАО «РЖД» С УЧЕТОМ ПОЛОЖЕНИЙ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ КАЧЕСТВА

В статье рассматриваются структурная реформа, проходящая в ОАО «РЖД»; предлагается новый взгляд на природу управления организацией на основе требований, указанных в международных стандартах; дается развернутый алгоритм действий для формирования политики в области качества как основного элемента результативного и эффективного управления производством.

На железнодорожном транспорте Российской Федерации в ближайший год завершается небывалая по своим масштабам и последствиям структурная реформа.

Особенно знаменательным является третий этап реформирования, связанный с внедрением трехзвенной системы управления холдингом ОАО «РЖД» и формированием управления отраслями железнодорожного транспорта по видам деятельности. С 2008 г. функционирует Первая грузовая компания (ПГК), заканчивается становление Второй грузовой компании (ВГК), что приведет к развитию конкуренции на рынке грузовых перевозок.

Однако при анализе текущего состояния системы управления качеством в Функциональной стратегии управления качеством ОАО «РЖД» (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 15.01.2007 г. № 46р) выделены основные недостатки существующей системы управления компанией: забюрократизированная система принятия управленческих решений; отсутствие четкого разделения границ полномочий и ответственности при взаимодействии подразделений ОАО «РЖД» при реализации ими своих функций; фрагментарность деятельности при управлении качеством; использование устаревших и не соответствующих современным требованиям технических средств и регламентов технической оснащенности; несовершенство существующей системы маркетинга; отсутствие системы управления внешними и внутренними рисками; неэффективное управление информационными потоками и использованием информации; несовершенство и непрозрачность существующей системы мотивации работников.

Для системного решения совокупности перечисленных проблем могут быть использованы положения международных стандартов качества, в которых аккумулирован мировой опыт управления не только качеством.

В современных экономических условиях ощущается острая потребность в новых управленческих технологиях. Доминирующий подход к управлению в отечественной практике основан на сочетании укрупненного планирования, которое нивелирует неравномерность реальных производственных процессов, и ситуационного административно-командного управления. Административно-командное управление основано на предположении о том, что все факторы поддаются управлению и могут быть заранее предусмотрены, а причиной любого неисполнения команды являются неправильные действия исполнителей, которые можно предотвратить угрозой наказания. Большинство нежелательных событий имеет стохастическую природу и не поддается точному прогнозу или запретам. Неэффективность такой концепции управления очевидна, но большинство руководителей не видят реальной альтернативы такому подходу. Все их попытки внедрения модных управленческих технологий заканчиваются неудачно. Проекты внедрения таких технологий занимают много времени, отвлекают персонал от текущей работы и оказываются нежизнеспособными в реальных условиях.

С другой стороны, имеются совершенно реальные примеры эффективного менеджмента, которые демонстрируются экономически развитыми государствами. Прямое копирование таких управленческих технологий в отечественных экономических условиях не дает ожидаемого результата, что свидетельствует о том, что их эффективность основана не на внутренних характеристиках, а на гармоничном взаимодействии с внешней технико-экономической средой. Отсюда можно сделать вывод о том, что отправной точкой эффек-

тивной системы управления компании могут быть только требования внешней технико-экономической среды.

Успешная и хорошо проверенная технология модернизации менеджмента содержится в п. 2.3 ГОСТ Р ИСО 9000-2008 «Подход к разработке и внедрению системы менеджмента качества». Этот подход универсален и пригоден не только для создания системы менеджмента качества, но и для всей системы менеджмента компании. Эффективность этой технологии очевидна, но она требует достаточно больших усилий для реализации. Этим можно объяснить то, что она не нашла применения в отечественной практике.

Отправной точкой для оптимальной управленческой системы согласно п. 2.3 ГОСТ Р ИСО 9000-2008 является «…определение потребностей и ожиданий потребителей, а также других заинтересованных сторон…». Согласно п. 3.1.2 этого же стандарта «…требование (requirement) – это потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным». Такое определение позволяет заменить в п. 2.3 ГОСТ ИСО 2000 – 2008 недостаточно конкретную формулировку «потребности и ожидания» на понятную – «требования». Для обоснования возможности применения п. 2.3 ГОСТ Р ИСО 9000-2008 не только для менеджмента качества, а для всей системы управления ОАО «РЖД» достаточно обратиться к стандарту ISO 9004:2009 и принять во внимание требования не только потребителей, но и всех заинтересованных сторон, которые представляют собой внешнюю технико-экономическую среду. Таким образом, неотъемлемой частью эффективной системы управления компанией должен быть реестр всех без исключения требований, предъявляемых к ОАО «РЖД» внешними заинтересованными сторонами.

Некоторые затруднения при формировании исчерпывающего реестра требований вызывает их многообразие и многочисленность источников. Преодолеть это затруднение помогают положения, представленные в таблице 1 стандарта ISO 9004:2009, в которой обозначены основные категории внешних заинтересованных сторон и предъявляемые ими требования. Исходные требования могут быть обязательными, запретительными (недопустимость каких-либо событий) и желательными (определяют желательные тенденции и динамику развития имеющихся характеристик).

Обязательные требования, в свою очередь, быть:

– количественными (одна или несколько взаимосвязанных характеристик, поддающихся измерению);

– процедурными (обязательный порядок выполнения работ);

– институциональными (правила, отражающие корпоративные нормы и ценности);

– структурными (немедленная готовность структур компании к выполнению каких-либо процедур);

– сравнительными, или качественными (соотношение фактической характеристики и сравниваемой или с критерием соответствия). Кроме этого требования могут быть аддитивными или простыми (одна характеристика с конкретным значением, которая может быть обеспечена простым сложением промежуточных характеристик), обобщенными (абстрактными), мультипликативными, или многофакторными (несколько характеристик, имеющих функциональную зависимость друг от друга).

Обобщенные требования возникают у вышестоящих отделов и подразделений по отношению к группе однородных нижестоящих. Такие требования могут быть выполнены только после конкретизации и учета специфики компании.

Многофакторные требования, как правило, носят экономический характер и отражают взаимную связь между разными показателями. Такие требования могут быть выполнены только после оптимизации всех взаимозависимых характеристик.

Следующим шагом создания эффективной системы управления согласно п. 2.3 ГОСТ Р ИСО 9000-2008 должно быть формирование «…политики и целей организации…», ориентированных на выполнение требований внешней среды.

Схема формирования политики и целей эффективной системы менеджмента представлена на рисунке 1. Из данной схемы видно, что после формирования общего реестра требований и их предварительной классификации необходимо выполнить декомпозицию аддитивных сложных и обобщенных требований, а также оптимизацию мультипликативных до уровня простых и измеримых. Декомпозицию и оптимизацию требований можно выполнить только с использованием программных средств. При этом некоторые промежуточные характеристики могут совпадать или находиться в противоречии друг с другом. Такие противоречия будут разрешены на последующих этапах формирования политики управления при расстановке приоритетов.

После обеспечения измеримости промежуточных характеристик должна быть проведена оценка выполнения соотношения фактической и срвнимаемой характеристик. Для этого необходимо выполнить достаточно трудоемкую работу по сбору данных о фактическом положении дел в компании. На этапе оценки исходного уровня выполнения требований происходит дополнительная декомпозиция, если в структурных подразделениях обнаружится разный уровень выполнения требований. В дальнейшем это позволит более точно определить цели политики управления и довести их до каждого подразделения.

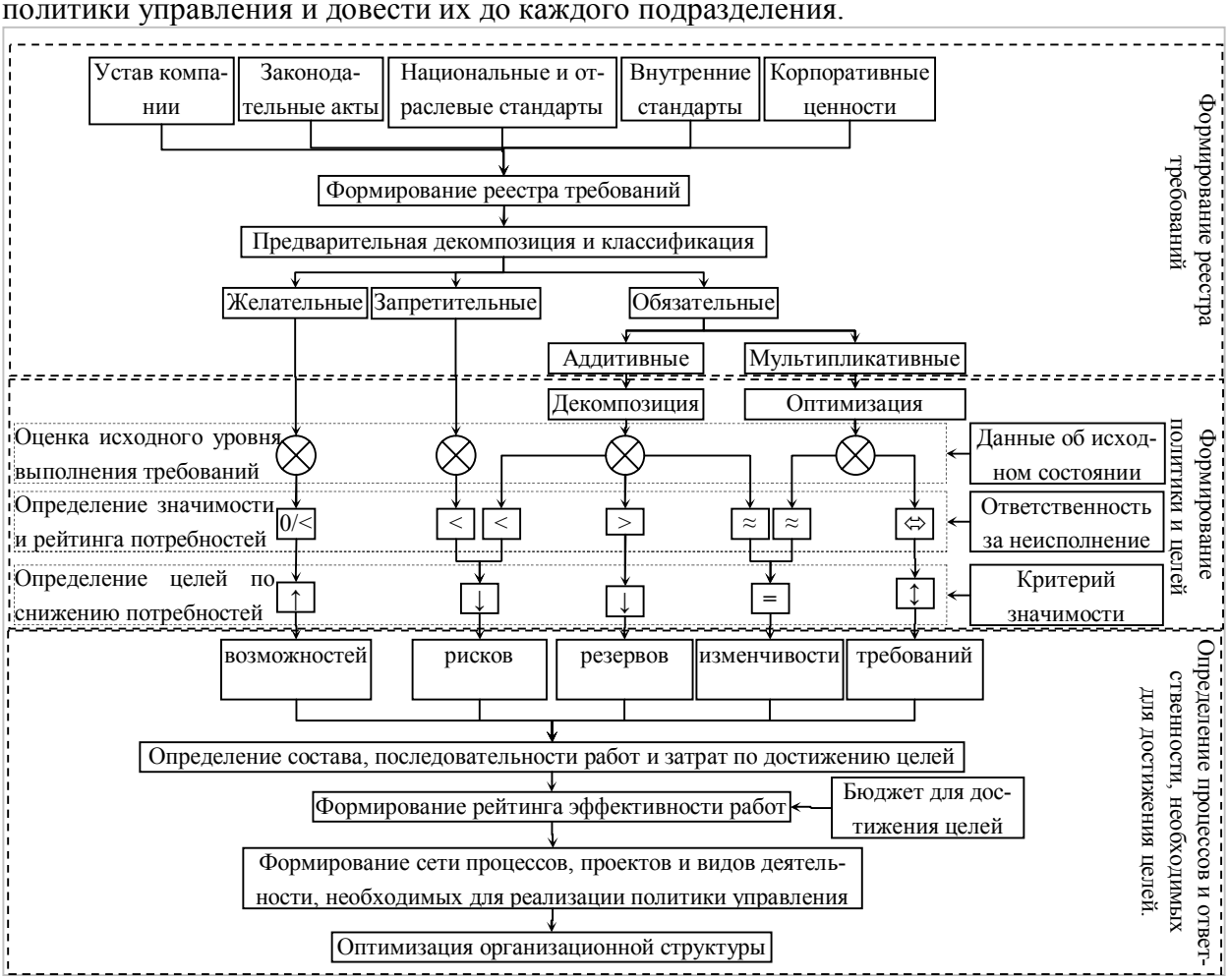


Рисунок 1 – Схема формирования целей и политики управления

При оценке исходного уровня выполнения требований могут быть получены следующие результаты:

– требование не выполняется, и для его выполнения нет условий;
– требование частично не выполняется;
– требование выполняется, но фактическая характеристика демонстрирует изменчивость;
– требование выполняется стабильно;
– фактическая характеристика превышает требующееся значение.

После оценки исходного уровня выполнения требований появляется возможность определения значимости потребностей. Значимость потребностей зависит от величины отклонения фактической характеристики от установленного требования; от ответственности компании за неисполнение требования (как правило, ответственность имеет стоимостное выражение и зависит также от вероятности наступления ответственности).

В общем случае значимость потребности определяется по формуле:

$$N_i = \left(\Delta A_{i-} + S_i\right)\left(R_i \cdot P_i\right) + \Delta A_{i+} \cdot C,$$

где N_i – потребность по *i*-му требованию;

ΔA_{i-} – нежелательное отклонение фактической характеристики от требования;

S_i – изменчивость фактической характеристики;

R_i – ответственность за неисполнение требования в стоимостном выражении;

P_i – вероятность наступления ответственности;

ΔA_{i+} – превышение значения фактической характеристики над требованием;

C – стоимость резервов.

Из приведенной формулы видно, что потребность возникает в случаях, если фактическая характеристика хуже характеристики, установленной требованием, имеет высокую изменчивость, излишне лучше характеристики, установленной требованием.

В первых двух случаях потребность зависит еще и от ответственности компании за неисполнение требования, а также от вероятности наступления такой ответственности. Если ответственность или вероятность ее наступления низкие, потребность будет также низкой, даже если фактическая характеристика будет хуже установленного требования. В случае необоснованного превышения фактического значения над требованием потребность заключается в излишнем расходовании ресурсов.

Для расчета потребностей целесообразно использовать программное средство. После выполнения такого расчета должен быть сформирован рейтинг потребностей, в верхней части которого будут расположены наиболее значительные, и на их снижение будет ориентироваться вся политика управления. Кроме этого должна быть определена общая сумма исходных потребностей, имевшихся на момент формирования политики управления. Это значение потребуется для оценки эффективности и результативности политики управления до начала ее реализации и результативности системы менеджмента после реализации политики управления.

Одним из предназначений политики управления является обеспечение баланса между потребностями и возможностями. Потенциально сумма всех потребностей компании может стремиться к бесконечности, а возможности всегда ограничены. Использование возможностей для снижения малозначительных потребностей неизбежно приводит к увеличению значительных с соответствующей неудовлетворенностью внешних заинтересованных сторон. Для поддержания баланса между потребностями и возможностями ОАО «РЖД» в рамках политики управления должен быть установлен критерий значимости потребностей. Потребности, значимость которых ниже критерия, будут временно проигнорированы политикой управления в планируемом периоде. Требования и потребности, оказавшиеся малозначительными, не должны исключаться из реестров. По мере устранения значительных потребностей в следующих циклах формирования и реализации политики управления их место в реестре будут занимать потребности, которые ранее считались малозначительными и игнорировались.

По отношению к значительным потребностям должны быть определены цели по их снижению на планируемый период. Цели принимаются в зависимости от характера требования (желательные, запретительные, обязательные). Так, для желательных требований цель может предусматривать достижение результата в прогнозируемый срок, который, в частности, может превышать планируемый срок действия политики управления. В новом цикле формирования и исполнения политики управления прогнозные сроки выполнения желательных требований могут пересматриваться с учетом новой ситуации. Целью запретительных требова-

ний не может быть нулевое значение нежелательных событий, а должен быть гарантийный период, в течение которого вероятность нежелательного события будет пренебрежимо мала. В частности, такой гарантийный период может совпадать с планируемым сроком действия политики управления или превышать его.

Для обязательных требований цель, как правило, заключается в полном снижении потребности.

После определения целей политики управления им присваивается значимость соответствующих потребностей и должны быть определены методы их достижения. Методы достижения целей зависят от сущности потребности и подразделяются на менеджмент возможностей (применяется для работ, которые ранее не выполнялись и которых выполнение не гарантирует получение ожидаемого результата); рисков (применяется для выполнения запретительных требований), требований (цикл параметрического управления, известный как «цикл PDCA Шухарта – Деминга»), изменчивости (метод управления, основанный на применении статистических методов и ориентированный на снижение изменчивости результатов), резервов (применяется для рационализации и оптимизации надежно выполняющихся работ).

Приведенная выше классификация видов менеджмента является ключевым элементом политики управления и ранее не публиковалась в специальной литературе. Вместе с тем перечисленные виды менеджмента активно используются в практике управления, но редко по прямому назначению. Неправильное применение видов менеджмента приводит к отрицательным результатам. Если менеджмент рисков применяется вместо менеджмента возможностей, продолжительность работ увеличивается, а результат может быть не достигнут. Если менеджмент резервов или возможностей применяется вместо менеджмента требований, это становится источником организационного хаоса и повышает изменчивость процессов. В реальной действительности руководители интуитивно выбирают виды менеджмента для решения текущих задач, которые возникают по всем перечисленным видам требований, что делает непрозрачным механизм принятия управленческих решений.

Перечисленные виды менеджмента взаимосвязаны между собой. Взаимная связь и области применения видов менеджмента иллюстрируются на рисунке 2, из которого следует, что области применения видов менеджмента частично пересекаются на разных этапах развития бизнеса. В компании одновременно существуют разные виды деятельности, находящиеся на разных этапах развития. Как правило, руководителям в своей текущей работе приходится одновременно управлять простыми текущими операциями, предотвращать нежелательные события, участвовать в проектах развития, заниматься рационализацией и оптимизацией стабильных процессов и устранять причины нестабильности. Предлагаемая классификация видов менеджмента позволит руководителям ОАО «РЖД» упорядочить свою текущую работу, повысить ее эффективность и результативность за счет правильного применения методов, присущих каждому из видов менеджмента.

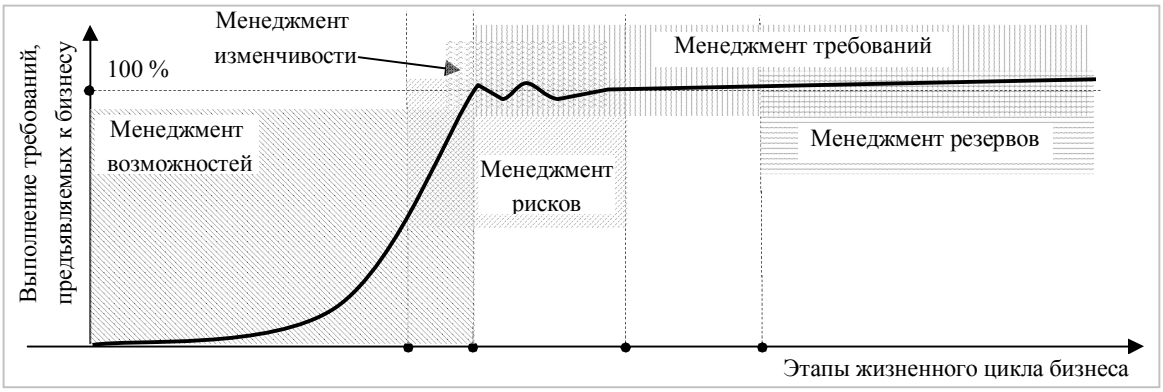


Рисунок 2 – Взаимная связь и области применения видов менеджмента

Менеджмент возможностей основан на применении следующих методов:

определение новых выгод, которые могут быть получены при реализации существующих возможностей (метод поиска и исследований);

определение недостающих ресурсов и решений для реализации возможностей (устранение неопределенностей и недостатка знаний, преодоление невежественности и консерватизма, изучение чужого опыта по решению аналогичных задач, применение методов ТРИЗ и др.);

повышение вероятности реализации возможности (обеспечения готовности ресурсов для инициирования желательного процесса, использование сопутствующих факторов, устранение противодействующих факторов или снижение зависимости от них, устранение неопределённостей);

повышение выгод от реализации возможности (выбор наиболее выгодной ситуации для реализации возможностей, синергетического сложения выгод от нескольких возможностей);

поддержание баланса между повышением возможностей и сопутствующим повышением рисков (частичное использование менеджмента рисков для снижения новых рисков);

получение выгод от реализации возможностей (проверка работоспособности новых процессов, переход к менеджменту требований и получению самовоспроизводящегося процесса получения выгод).

определение состава нежелательных событий (метод поиска и анализа своего и чужого опыта);

снижение вероятности нежелательного события (работа в безрисковых интервалах, синхронизация факторов, сочетание которых приводит к началу нежелательного процесса, устранение одного из факторов из неблагоприятного сочетания);

заблаговременное выявление начала нежелательного процесса (определение предпосылок и предвестников и их идентификация; контроль над предпосылками и предвестниками; сокращения времени реагирования);

повышение эффективности противодействия нежелательному процессу (повышение степени готовности средств противодействия; устранение любого из ресурсов, потребляемых нежелательным процессом);

снижение ущерба от нежелательного процесса (устранение (исправление) последствий нежелательного процесса; страхование и резервирование);

поддержание баланса между снижением рисков и сопутствующим снижением возможностей.

Менеджмент требований основан на применении следующих методов:

планирование (что, когда, как);

организация (кто, из каких ресурсов, когда начать, учесть особенности задания и факторов внешнего влияния, устранить дефицит ресурсов и организационные неопределенности);

контроль (оптимальной скорости процессов, промежуточных и конечных результатов);

устранение ошибок (по мере необходимости).

Менеджмент требований является общеизвестным и широко распространенным методом параметрического управления цикличными процессами. Для эффективности данного метода необходимо обеспечить различимость не менее двух состояний, находящихся в области устойчивого управления. Без выполнения этого условия управленческий цикл размыкается. Данный вид менеджмента не может применяться для выполнения следующих требований:

желательных (из-за невозможности планирования проектов, связанных с заранее неизвестными факторами и большой вероятностью некачественного результата в случае принудительного сокращения сроков или состава работ, которые может вызвать управленческий цикл PDCA);

запретительных (из-за неспособности управленческого цикла выявлять приближение состояния к области несоответствий и естественного движения цикла PDCA к нижней границе области управления, которая находится в области несоответствия).

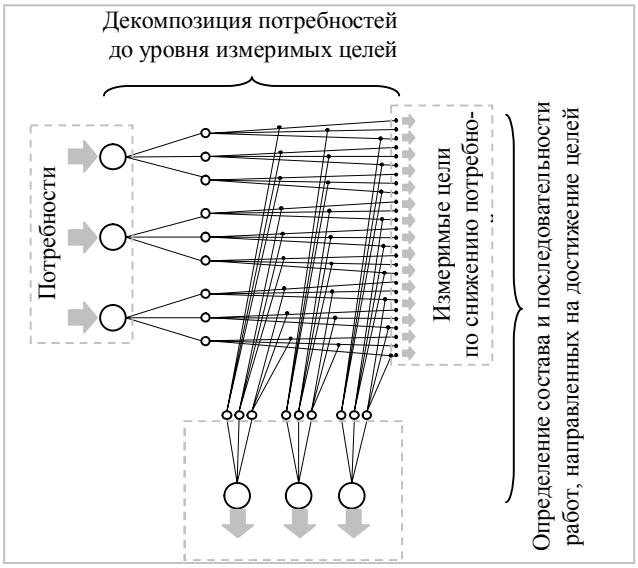


Рисунок 3 – Механизм сокращения количества методов достижения целей политики управления

Менеджмент требований не может применяться также в условиях стохастической изменчивости заданий и факторов влияния в связи с тем, что отдельные случайные события не поддаются планированию или прогнозу, а укрупненное планирование делает результаты неизмеримыми. Такие условия могут возникать при массовом обслуживании или при работе в трудно – прогнозируемых внешних условиях.

Менеджмент резервов основан на применении следующих методов:

– определения резервов и узких мест с последующим использованием первых для устранения последних;

– рационализации и оптимизации операционной деятельности;

– стандартизации успешного опыта.

Менеджмент изменчивости является обширной областью, которая не может быть полностью описана в рамках данной статьи. Менеджмент изменчивости основан на устранении первичных факторов организационного и технологического хаоса (энтропии). В рамках данного метода применяются хорошо известные методы статистического управления процессами: контрольные листки, диаграммы Парето, диаграммы причин и результатов (диаграмма Исикавы), гистограммы, диаграммы рассеяния, контрольные карты, метод расслоения (стратификации).

В рамках формирования политики управления определяются оптимальные методы достижения целей, основанные на соответствующих видах менеджмента. При этом решается важная методическая задача – трансформация потенциально бесконечного количества конкретных целей к конкретному количеству методов. Без решения этой задачи будет нарушен принцип необходимости и достаточности в отношении всей системы менеджмента. Суть этой проблемы заключается в том, что внешние заинтересованные стороны могут предъявлять неограниченное количество требований. Для приведения числа требований к рациональному количеству их приходится обобщать. Обобщенные требования становятся неизмеримыми. Невозможность измерения обобщенных требований не позволяет управлять работами по их выполнению. Как было показано выше, обобщенные и другие сложные требования подвергаются конкретизации и декомпозиции. При этом ограниченное количество обобщенных требований может превратиться в бесконечное количество конкретных и при этом также будет утрачена возможность управления работами по их выполнению. На практике эта теоретическая проблема не возникает. В процессе декомпозиции конкретные требования повторяются, и на последнем этапе число целей оказывается большим, но конечным. При определении методов достижения целей происходит эффект обратного свертывания за счет того, что многие работы позволяют достигать нескольких целей одновременно (рисунок 3).

При определении работ, которые необходимо выполнить для достижения целей, оказывается, что многие из них применяются для достижения разных целей. Использование специальных программных средств позволяет учесть значимость таких работ путем суммирования ранее определенной значимости потребности.

После определения полного состава проектов, бизнес-процессов и видов деятельности, необходимых для реализации политики управления и достижения целей, выполняется расчет себестоимости этих работ. Отношение между суммой значимости целей, для достижения которых предназначается каждая из работ, и их себестоимость могут считаться эффективно-

стью данных работ. Это позволяет сформировать рейтинг эффективности работ, в верхней части которого буду расположены работы, которые позволяют при минимальных затратах достигнуть максимальных целей. Общая сумма всех работ может оказаться выше финансовых возможностей ОАО «РЖД». При этом выполняется второй этап поддержания баланса между потребностями и возможностями компании. В рейтинге эффективности работ устанавливается порог по уровню бюджетных возможностей. После этого требуется несколько циклов итераций, в рамках которых может быть найден способ снижения себестоимости отдельных работ, неэффективные работы могут быть замещены более эффективными или иогут быть пересмотрены первоначальные цели. После завершения цикла оптимизации целей и методов политики управления будет окончательно сформирована спецификация проектов, бизнес-процессов и видов деятельности, необходимых для реализации политики управления и достижения целей в планируемом периоде функционирования ОАО «РЖД».

Последний этап формирования политики управления должен обеспечить оптимизацию организационной структуры, необходимой для выполнения всех проектов, бизнес-процессов и видов деятельности. При этом обеспечивается формирование оптимальной организационной системы.

Реальная результативность и эффективность организационной системы может быть оценена после завершения планируемого периода. При этом под результативностью будет пониматься ее способность снизить потребности до запланированного уровня, а под эффективностью – способность достижения запланированных целей в рамках бюджетных возможностей.

Предложенный выше метод позволяет как значительно повысить результативность системы управления в ОАО «РЖД» в целом, так и решить большинство из отмеченных в начале статьи проблем. Применение данного метода даст возможность поэтапно актуализировать имеющуюся документацию, четко распределять обязанности и ответственность между подразделениями, а также поощрять отдельных работников ОАО «РЖД» и эффективно управлять существующими и потенциальными рисками. В результате автоматизации процесса управления ОАО «РЖД» станет менее бюрократизированной и будет действовать на основе международных стандартов, что сделает ее равноправным конкурентом на международном рынке.

УДК 629.424.1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Балагин Олег Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы».
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginOV@omgups.ru

Чулков Алексей Владимирович
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Балагин Дмитрий Владимирович
Аспирант, инженер кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

В статье рассматривается математическая модель процесса технической эксплуатации дизельного локомотива, учитывающая изменение внешних условий, техническое состояние, режимы работы дизель-генераторных установок в реальных условиях эксплуатации локомотивов и их влияние на расход топлива.

Ключевые слова: *математическая модел, дизель-генераторная установка, расход топлива, техническая эксплуатация, дизельный локомотив.*

MATHEMATICAL MODEL OF TECHNICAL OPERATION PROCESS OF DIESEL LOCOMOTIVES

Balagin Oleg Vladimirovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Locomotives».
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginOV@omgups.ru

Chulkov Alexey Vladimirovich
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.

Balagin Dmitry Vladimirovich
The post-graduate student, engineer of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

In article the mathematical model of technical operation process of the diesel locomotive, considering change of external conditions, a technical condition, operating modes diesel engine-generating of installations in actual practice operation of locomotives and their influence on fuel consumption is considered.

Keywords: *mathematical model; diesel engine-generating installation; fuel consumption; technical operation; diesel locomotive.*

УДК 629.423.31

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЙ

Белан Дмитрий Юрьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Инженер научно-исследовательской части (НИЧ).
E-mail: nich@omgups.ru

Лузин Владимир Михайлович
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава», ОмГУПС.
E-mail: nich@omgups.ru

В данной статье проведен анализ существующих методов упрочнения поверхности деталей машин. Для повышения износостойкости коллекторных пластин тяговых электродвигателей предлагается использовать метод электроискрового легирования.

Ключевые слова: *тяговый электродвигатель, коллекторно-щеточный узел, электроискровое легирование, упрочнение, износостойкость.*

IMPROVE THE RELIABILITY OF THE COLLECTOR-BRUSH ASSEMBLY TRACTION MOTOR

Belan Dmitry Yuryevich
Omsk State University of Transport (OSUT).
35 Marx ave., 644046 Omsk, Russia.
Engineer on the research department.
E-mail: nich@omgups.ru

Luzin Vladimir Mihkailovich
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Technology of transport machine-building and repair of rolling stock», OSTU.
E-mail: nich@omgups.ru

In this article, an analysis of existing methods of surface hardening of machine parts. To improve the durability of the collector plates, traction motors is proposed to use the method of electrospark doping.

Keywords: *traction motor, the collector-brush unit, electrospark doping, hardening, wear resistance.*

УДК 629.4.082

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОТОРНО-ОСЕВОГО УЗЛА КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА ЛОКОМОТИВА

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

Предложены новые конструктивные решения высоконагруженных опорных узлов локомотивов, позволяющие повысить их эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: *локомотив, тяговый привод, подшипник, смазка.*

MODERNIZATION OF MOTOR-AXIAL UNIT OF LOCOMOTIVES

Borodin Anatoly Vasilievich
Dr. Sci., professor, head of the chair «Theory of mechanisms and machine elements» (OSTU).
Phone: (3812) 31-06-18.
E-mail: tmdm@omgups.ru

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

New constructive decisions high pressure basic units of locomotives allowing considerably to raise their operational characteristic are offered.

Keywords: *the locomotive, a traction drive, the bearing, greasing.*

УДК 543.423.1

ВНУТРИЛАБОРАТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ.

Кузнецов Андрей Альбертович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника».
Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Мешкова Ольга Борисовна
Старший преподаватель кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-88.

.

В работе рассматривается способ повышения устойчивости градуировочных графиков при проведении анализа металлов и сплавов методом атомно-эмиссионного спектрального анализа. Предлагаются решения для обеспечения требуемого уровня точности при проведении непрерывного контроля в изменяющихся производственных условиях, влияющих на результаты измерений.

Ключевые слова: *контроль, материалы, точность, детали и узлы подвижного состава, спектральный.*

INTRALABORATORY CONTROL OF ACCURACY OF RESULTS OF THE SPECTRAL ANALYSIS WITH APPLICATION OF CONTROL CARDS.

Kuznetsov Andrey Albertovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., associate professor, head of the chair «Theoretical the electrical engineer».
Phone: (3812) 31-06-88.
E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Meshkova Olga Borisovna
The senior teacher of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-88.

In work the way of increase of stability градуировочных schedules is considered at carrying out of the analysis of metals and alloys by a method of the atomno-issue spectral analysis. Decisions for maintenance of demanded level of accuracy at carrying out of continuous control in the changing working conditions influencing results of measurements are offered.

Keywords: *control, materials, accuracy, details and rolling stock knots, spectral.*

УДК 629.45.048

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ В ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДАХ ДАЛЬНЕГО СЛЕДОВАНИЯ

Матяш Юрий Иванович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».
Тел.: 8-960-990-13-89.

Томилова Ольга Сергеевна
Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-971-60-81.
E-mail: motovilova@yandex.ru

В статье рассмотрена проблема очистки воды в пассажирских вагонах дальнего следования, пути решения по обеззараживанию воды, предложены устройства для обработки воды ультрафиолетовым излучением.

Ключевые слова: *водоснабжение, загрязнение, обеззараживание, ультрафиолет, излучение.*

ARRANGEMENT FOR WATER DISINFECTION IN CARRIAGES FOR LONG-DISTANCE TRAFFIC

Matyash Jury Ivanovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., associate professor, of the chair « Railway cars and car enterprise».
Phone: 8-960-990-13-89.

Tomilova Olga Sergeevna
The post-graduate student of chair « Railway cars and car enterprise», OSTU.
Phone: 8-913-971-60-81.
E-mail: motovilova@yandex.ru

In article is observing the problem of water purification in carriages for long-distance traffic ways of the decision of disinfecting water, are offered devices for processing of water by ultra-violet radiation.

Key words: *water supply, contamination, of water purification, ultra-violet, radiation.*

УДК 621.436:629.424.1

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДИЗЕЛЯ

Сковородников 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.
E-mail: skov1945@mail.ru

Анисимов Александр Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: anisimovas1971@mail.ru

Гришина Юлия Борисовна
Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: gubuly@mail.ru

Приводятся данные по определению пределов изменения продолжительности сгорания и показателя характера сгорания при моделировании теплового расчета дизельного двигате-

ля методом Вибе. Дан анализ влияния продолжительности сгорания и показателя характера сгорания на параметры процесса сгорания и индикаторные показатели работы дизеля.

Ключевые слова: *дизельный двигатель, тепловой расчет, метод Вибе, индикаторные показатели.*

INFLUENCE OF PARAMETERS OF BURNING OUT OF FUEL ON EFFICIENCY DIESEL ENGINE RUNNING CYCLE

Skovorodnikov Evgenie Ivanovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor of the chair «Locomotives».
Phone: (3812) 31-34-17, (3812) 68-45-08.
E-mail: skov1945@mail.ru

Anisimov Alexander Sergeevich
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair « Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.
E-mail: anisimovas1971@mail.ru

Grishina Julia Borisovna
The post-graduate student of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.
E-mail: gubuly@mail.ru

Data by definition of limits of change of duration of combustion and an indicator of character of combustion are cited at modeling of thermal calculation of the diesel engine by method Вибе. The analysis of influence of duration of combustion and an indicator of character of combustion on parameters of process of combustion and display indicators of work of a diesel engine is given.

Key words: *the diesel engine, thermal calculation, method of Vibe, display indicators.*

УДК 629.423

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЭКИПАЖА

Смалев Александр Николаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Теоретическая механика».
Тел.: (960) 994-81-39.
E-mail: SmalevAN@yandex.ru

В статье приведены некоторые математические модели вертикальной динамики экипажа различной степени сложности и проведено сравнение результатов расчетов по каждой из них. Сделан вывод о необходимости уточнения модели только в той мере, которая требуется для анализа динамических характеристик конкретного элемента экипажа.

Ключевые слова: *вертикальная динамика, математическая модель, уточнение модели, степень свободы, передаточная функция, спектральная плотность, среднеквадратическое отклонение.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF LOCOMOTIVE UNDERFRAME VERTICAL DYNAMICS

Smalev Alexandr Nikolaevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The teacher of chair «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (960) 994-81-39
E-mail: SmalevAN@yandex.ru

In article some mathematical models of locomotive underframe vertical dynamic are presented of different complexity, and a comparison of each model calculation result is held. A conclusion is drawn about need to clarify the model in that way the exact element of undeframe demands its dynamic characteristics to be analyzed.

Keywords: *vertical dynamics, mathematical model, clarification of model, degree of freedom, transfer function, spectral density, standard deviation.*

УДК 662.61.502.36

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДЫМОВОЙ ТРУБЫ БЛОЧНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОТЕЛЬНОЙ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

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

Жданов Николай Владимирович
Преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: zhdanov-n@mail.ru

В статье предлагается методика определения температуры внутренней поверхности стальной дымовой трубы блочной автоматизированной котельной. Алгоритм расчета реализован в разработанной программе для ПЭВМ, которая используется в практике проектирования.

Ключевые слова: *котельная дымовая труба, температура стенки, теплообмен*

FEATURES OF THE TEMPERATURE MODE OF THE CHIMNEY OF THE BLOCK AUTOMATED BOILER-HOUSE WORKING ON NATURAL GAS

Vedruchenko Viktor Rodionovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci.Tech., professor of the chair «Power system».
Phone.: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Zhdanov Nicolai Vladimirovich
The teacher of the chair «Power system», OSTU
Phone.: (3812) 31-06-23.
E-mail: zhdanov-n@mail.ru

In article the technique of definition of temperature of an internal surface of a steel chimney of the block automated boiler-house is offered. The algorithm of calculation is realized in the developed program for personal computer which is used in practice of designing.

Key words: *a boiler chimney, temperature of a wall, heat exchange.*

УДК 621.331: 621.311.004.18

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

Ибрагимова Ольга Анатольевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Теплоэнергетика».
Тел.: (3812) 31-06-23., 8-913-619-20-95.
E-mail: ibr-olga@rambler.ru

Лебедев Виталий Матвеевич
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: heatomgups@mail.ru

В статье предлагаются основные направления совершенствования работы существующих источников тепла. Приведены расчеты по возможной совместной работе омской ТЭЦ-5 и котельной ООО «Электротехнический комплекс» в качестве одного из способов оптимизации работы системы теплоснабжения района города.

Ключевые слова: *ТЭЦ, котельная, совместная работа, температурный график, температура наружного воздуха.*

DIRECTIONS OF PERFECTION OF WORK OF EXISTING SOURCES OF HEAT

Ibragimova Olga Anatolievna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of chair «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: ibr-olga@rambler.ru

Lebedev Vitalij Matveevich
Dr. Sci. Tech., professor, heat of chair «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: heatomgups@mail.ru

In article the basic directions of perfection of work of existing sources of heat are offered. Calculations on possible teamwork of Omsk thermal power station-5 and Open Company boiler-house «the Electro technical complex» as one of ways of optimization of work of system of a heat supply of a district of the city are resulted.

Keywords: *thermal power station, boiler, teamwork, the temperature schedule, temperature of external air.*

УДК 621.331:621.311.004.18

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСАВП В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ

Каштанов Алексей Леонидович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЧ.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: KashtanovAL@omgups.ru

Ларин Андрей Николаевич
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС
Тел.: 8-908-310-78-60.
E-mail: larinan75@mail.ru

Пономарев Антон Витальевич
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-88.

Унифицированные системы автоматизированного ведения поезда дают ряд преимуществ по сравнению с управлением подвижного состава машинистом. С целью обоснования целесообразности внедрения данного комплекса возникает необходимость в разработке методики по оценке технико-экономического эффекта. Кроме того, анализ результатов, основанный на статистической обработке исходных данных, позволит определять условия, при которых достигается максимальный эффект при использовании систем УСАВП.

Ключевые слова: *система автоведения, эффективность, электрическая энергия, удельный расход, тяга поездов*

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF USE УСАВП IN CARGO MOVEMENT

Kashtanov Alexey Leonidovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech. Sci., the senior scientific employee of a research part.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: KashtanovAL@omgups.ru

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

Ponomarev Anton Vitalevich
Cand.Tech.Sci., the teacher of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-88.

The unified systems of the automated conducting a train give a number preimu-shchestv in comparison with management of a rolling stock of the machinist. For the purpose of a substantiation of expediency of introduction of the given complex there is a necessity for working out of a technique according to technical and economic effect. Besides, the analysis of results based on statistical processing of the initial data, will allow to define conditions at which the maximum effect is reached at use of systems USAVP.

Keywords: s*ystems of automatic control of traffic, efficiency, electric power, specific consumption, hauling operation*

УДК 621.331:621.311.4:621.314.5

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В ИНВЕРТОРНОМ РЕЖИМЕ, ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Комякова Ольга Олеговна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-88.

Комякова Татьяна Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-57.

В работе выполнен гармонический анализ сетевого тока двенадцатипульсового выпрямительно-инверторного преобразователя с последовательным соединением шестипульсовых мостовых секций, работающего в инверторном режиме, при несимметричном несинусоидальном напряжении питающей сети.

Ключевые слова: *гармоники, сетевой ток, выпрямительно-инверторный преобразователь, несимметричное и несинусоидальное напряжение.*

THE HARMONIOUS ANALYSIS OF THE NETWORK CURRENT OF THE CONVERTER WORKING IN ИНВЕРТОРНОМ THE MODE, AT ASYMMETRICAL NOT SINUSOIDAL PRESSURE POWER LINE

Komjakova Olga Olegovna
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.

Komjakova Tatyana Vladimirovna
Cand.Tech. Sci., the senior lecturer of chair «Elektrosnabzhe-nie of a railway transportation », OSTU.
Phone: (3812) 31-06-57.

In work the harmonious analysis of a network current двенадцатипульсового vyprja-mitelno-invertornogo the converter with consecutive connection shestipulso-vyh the bridge sections, working in инверторном a mode is made, at asymmetrical nesinu-soidalnom pressure of a power line

Keywords: *harmonics a network current, vyprjamitelno-invertornyj the converter, asymmetrical and not sinusoidal pressure.*

УДК 621.331.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОРА МЕСТ УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ И ПРОТЕКАНИЯ УРАВНИТЕЛЬНЫХ ТОКОВ

Кондратьев Юрий Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта»
Тел.: (3812) 31-36-46.

Привалов Станислав Янович
Инженер кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: 8-904-323-61-28.
E-mail:PrivalovSJa@omgups.ru

В статье рассматриваются недостатки существующего метода расчета параметров устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности в условиях рекуперативного торможения и протекания уравнительных токов. На примере имитационного моделирования реального участка электрифицированной железной дороги переменного тока показаны расчет параметров и выбор места установки устройств компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: *система тягового электроснабжения, показатели качества электрической энергии, уравнительный ток, компенсация реактивной мощности, установка попе-*

речной емкостной компенсации, установка продольной емкостной компенсации, имитационное моделирование, потери мощности.

Kondratyev Yury Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Elektrosnabzhe-nie of a railway transportation »,
Phone: (3812) 31-36-46.

Privalov Stanislav
The engineer of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: 8-904-323-61-28.
E-mail:PrivalovSJa@omgups.ru

In article lacks of an existing method of calculation of parameters of devices of longitudinal and cross-section indemnification of jet capacity of conditions rekupe-rativnogo braking and courses of leveling currents are considered. On an example imitating mo-delirovanija a real site of the electrified railway of an alternating current on-kazan calculation of parameters and a choice of an installation site of devices of indemnification of jet capacity.

Keywords: *сиcтема a traction electrical supply, indicators of quality of electric energy, a leveling current, indemnification of jet capacity, installation of cross-section capacitor indemnification, installation longitudinal capacitor indemnification, imitating modeling, capacity losses.*

УДК 620.97

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Парамонов Александр Михайлович
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: amparamonov@mail.ru

Резанов Евгений Михайлович
Инженер кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС
Тел.:(3812)31-06-23.
E-mail:rezanove@rambler.ru

Кушнаренко Антон Вячесавович
аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел: (3812)31-06-23.
E-mail: kushnarenko_av@mail.ru

Предложена методика определения оптимальной температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива в термических печах с радиационными трубами. Разработан алгоритм, для ее определения, исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на рекуператор и топливо.

Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма для определения экономически наиболее выгодной температуры подогрева воздуха в рекуператоре, идущего на

горение топлива, при проектировании и эксплуатации термических печей с радиационными трубами. Использование данных разработок позволяет повысить тепловую эффективность и экономичность их работы.

Ключевые слова: *термическая печь, радиационная труба, затраты, температура, алгоритм, эффективность.*

INCREASE OF EFFICIENCY OF POWER SAVINGS AT WORK OF HEATING FURNACES

Paramonov Alexander Mihajlovich
Dr.Sci. Tech., professor of the chair «Power system», OSTU
Phone.: (3812)31-06-23
E-mail: amparamonov@mail.ru

Rezanov Evgenie Mihajlovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The engineer of chair «Power system», OSTU
Phone: (3812)31-06-23.
E-mail: rezanove@rambler.ru

Kushnarenko Anton Vjachesavovich
The post-graduate student of chair «Power system», OSTU.
Phone: (3812)31-06-23.
E-mail: kushnarenko_av@mail.ru

The technique of definition of optimum temperature of heating of air going for burning of fuel in thermal furnaces with radiating pipes is offered, the algorithm is developed for its definition, proceeding from a minimum of the total discounted expenses for a recuperator and fuel.

The expediency of application of the developed algorithm for definition economically the optimal temperature of heating of air in a recuperator, fuel going on burning is proved, at designing and operation of thermal furnaces with radiating pipes. Use of the given workings out allows to raise thermal efficiency and profitability of their work.

Keywords: *the thermal furnace, a radiating pipe, expenses, temperature, algorithm, efficiency.*

УДК 629.4

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПАСПОРТЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ.

Сидорова Елена Анатольевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и механика», ОмГУПС.
Тел.: 31-18-66.
E-mail: Armsid@mail.ru

Давыдов Алексей Игоревич
Аспирант кафедры «Прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Phone.: 8-906-990-93-84.
E-mail: DavydovAI@bk.ru

Статья посвящена вопросам организации энергетического обследования тяги поездов в структурных подразделениях железных дорог.

Ключевые слова: *энергоаудит, энергетический паспорт, тяга поездов, энергоэффективность, целевые индикаторы.*

CHARACTERISTICS OF ENERGY CONSUMPTION FOR TRAIN TRACTION IN THE ENERGY PASSPORT OF RAILROAD

Sidorova Elena Anatolevna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci.Tech., professor of the chair « Applied Mathematics and Mechanics», OSTU

Phone.: 31-18-66.
E-mail: Armsid@mail.ru

Davydov Alexey Igorevich
Postgraduate student of the chair «Applied Mathematics and Mechanics», OSTU.
Phone.: 8-906-990-93-84.
E-mail: DavydovAI@bk.ru

The article deals with the organization of the energy survey train traction in subdivisions of railways.

Key words: *energy audits, energy performance certificate, trains traction, energy efficiency, target indicators.*

УДК 621.331: 621.311.004.18

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НУЖД ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Тарута Мария Викторовна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23., 8-913-607-64-63.
E-mail: Marta_omgups@mail.ru

Финиченко Александра Юрьевна
Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.

В статье рассматриваются вопросы использования теплонасосных установок для обеспечения потребителей тепловой энергией. Приведены наиболее перспективные районы залегания подземных и грунтовых вод на территории России. Перечислены основные преимущества и недостатки, возникающие при эксплуатации тепловых насосов.

Ключевые слова: *теплонасосная установка, потребитель, низкопотенциальное тепло, тепловая энергия.*

USES HEATPUMP OF INSTALLATIONS FOR NEEDS OF CONSUMERS

Taruta Marya Viktorovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand. Sci. Tech., the teacher of chair «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: Marta_omgups@mail.ru

Ibragimova Olga Anatolievna
The post-graduate student of chair «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: ibr-olga@rambler.ru

In article use questions heat pump installations for maintenance of consumers with thermal energy are considered. The most perspective areas arrangement underground and ground waters in territory of Russia are resulted. The basic advantages and lacks arising at operation of thermal pumps are listed.

Keywords: *the heat pump installation, the consumer, the low potential warmly, thermal energy.*

УДК 621.314

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Третьяков Евгений Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».
Тел.: 8-905-921-47-30.
E-mail: tretyakovea@omgups.ru

Малышева Надежда Николаевна
Преподователь кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС
Тел.: 8-913-154-76-96.
E-mail: malyshevann@land.ru

Краузе Андрей Викторович
Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: 8-904-329-06-23.
E-mail: kruserjeep@mail.ru

В настоящее время существуют технические решения и технологии, позволяющие полностью компенсировать как неизменную, так и резкопеременную реактивную составляющую мощности нагрузки. Однако вопрос о выборе типов компенсирующих устройств и их параметров является весьма актуальным. Авторами предлагается подход к выбору компенсирующих устройств, который заключается в том, что компенсацию групповой резкопеременной нагрузки необходимо выполнять не одним компенсатором с высокой удельной стои-

мостью, а группой таких устройств, причем большая доля реактивной мощности – неизменная составляющая – компенсируется статическими компенсаторами, а переменная составляющая – регулируемыми компенсаторами с учетом технической реализуемости. В данной работе представлен разработанный алгоритм определения оптимального состава и структуры компенсирующих устройств исходя из требуемой компенсации реактивной мощности неизменной и переменной составляющих по критерию минимума затрат.

Ключевые слова: *реактивная мощность, компенсирующие устройства, оптимизация структуры компенсирующих устройств, целевая функция, минимум приведенных затрат.*

THE STRUCTURE OPTIMIZATION OF COMPENSATING DEVICES

Tretjakov Evgenie Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Electric cars and theoretical the electrical engineer »
Phone: 8-905-921-47-30.
E-mail: tretyakovea@omgups.ru

Malysheva Nadezhda Nikolaevna
The senior teacher of chair «Electric cars and theoretical the electrical engineer», OSTU
Phone: 8-913-154-76-96.
E-mail: malyshevann@land.ru

Krauze Andrey Viktorovich
The post graduate of chair «Electric cars and theoretical the electrical engineer», OSTU
Phone: 8-904-329-06-23.
E-mail: kruserjeep@mail.ru

There are technical decisions and the technologies allowing completely to compensate invariable and sharpvariable reactive capacity component of load now. However the question on a choice of compensating devices type and their parametres high-actual. Authors is propose approach to a choice of compensating devices which consists that indemnification sharpvariable group loadings is necessary execute out any jack with high specific cost, and group of such devices, and the big share - the invariable component - compensate SVC, the variable component - adjusting compensator with a glance marketability technical. In the work the developed algorithm of definition optimum analysis and compensating devices structure in consideration of demanded compensation invariable reactive power and variable components by criterion expenses a minimum is presented.

Keywords: *the reactive power, compensating devices, structure optimization of compensating devices, objective function, a minimum of the reduced expenses.*

УДК 621.311.016.24

СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Чижма Сергей Николаевич,
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления»
Тел. 31-05-89.
E-mail: chizhmasn@omgups.ru

В статье рассмотрено понятие мощности для несинусоидальных цепей, выполнен анализ теорий мощности и определений реактивной и неактивной мощности, проведен анализ стандартов, в соответствии с которыми осуществляют измерения мощности, предложен алгоритм учета составляющих мощности несинусоидальных сигналов – полной, активной, обменной мощности, мощности потерь, а также коэффициентов, показывающих структуру потерь в несинусоидальных цепях.

Ключевые слова: *полная, активная, неактивная, реактивная, мощность потерь, обменная мощность.*

MAKING CAPACITIES AT NOT SINUSOIDAL OPERATING MODES OF SYSTEMS OF AN ELECTRICAL SUPPLY OF THE RAILWAYS

Chizhma Sergey
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior of chair«Automatic and control systems».
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: chizhmasn@omgups.ru

In article the concept of capacity for not sinusoidal chains is considered, the analysis of theories of capacity and definitions of jet and inactive capacity is made, the analysis of standards according to which carry out capacity measurements is carried out, the algorithm of the account of components of capacity of not sinusoidal signals - full, active, exchange is offered, to capacity of losses, and also the factors showing structure of losses in not sinusoidal chains

Keywords: *total, active, inactive, jet power, power of losses, exchange power*

УДК 519.65

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ОДНОТОНАЛЬНОГО СИГНАЛА

Альтман Евгений Анатольевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления».
тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: altmanea@gmail.com

Елизаров Дмитрий Александрович
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: 7-913-674-2005.
E-mail: elizarovda@gmail.com

В статье произведен анализ работы методов определения частоты однотонального сигнала. В работе рассматриваются следующие алгоритмы: метод Якобсена (Jacobsen's

Modified Quadratic Estimator), метод Макледода (Macleod's Estimator), два метода Квина (Quinn's Estimator, Quinn's Second Estimator) и метод корреляционных функций. Для всех методов определяется отклонение частоты напряжения переменного тока в тяговых электрических сетях железных дорог.

Ключевые слова: *однотональный сигнал, частота, энергоэффективность, алгоритм, спектр сигнала, «белый шум», ДПФ, соотношение «сигнал – шум».*

RESEARCH METHODS TO ESTIMATION FREQUENCY S OF THE SINGLE- TONES

Altman Evgeniy Anatolevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand. Tech. Sci.,the senior lecturer of chair «Automatics and control systems».
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: altmanea@gmail.com

Elizarov Dmitry
The post-graduate student of chair «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: 7-913-674-2005.
E-mail: elizarovda@gmail.com

The paper has been analysis the work of methods by definition frequency of single tone. In the work following algorithms, such as a method of Jakobsena (Jacobsen's Modified Quadratic Estimator), a method of Makledoda (Macleod's Estimator), two methods of Quinn (Quinn's Estimator, Quinn's Second Estimator) and a method of correlation functions are considered. For all methods the deviation of frequency of pressure of an alternating current in traction electric networks of railways is defined. The method of correlation functions has shown the least size of bias.

Keywords: *single-frequency tone, frequency, power efficiency, algorithm, signal spectrum, white noise, DFT, Signal-to-Noise Ratio.*

УДК 656.259.12

ПРИНЦИП МНОГОКАНАЛЬНОСТИ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЙ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

Тарасов Евгений Михайлович
АМОУ ВПО «Самарская академия государственного и муниципального управления».
443084, Самара, ул. Стара-Загора, 96.
Доктор технических наук, проректор по науке и инновациям.
Тел.: 8(846) 951-54-66.
E-mail: smimnauka@yandex.ru

В статье обоснована необходимость использования в инвариантных системах принципа многоканальности для реализации классификаторов состояния рельсовых линий. Разработана обобщенная структурная схема инвариантного классификатора состояний рельсовой линии, построенного по принципу двухканальности.

Ключевые слова: *многоканальность, динамические звенья, возмущающее воздействие, инвариантность, многополюсник, рельсовая линия.*

PRINCIPLE OF MULTICHANNEL CONTROL WITHIN THE TASKS OF RAILWAY LINES CLASSIFYING

Tarasov Eugeny
Establishment «Samara Academy of State and Municipal Management»
443084, Samara, 96 Stara Zagora street/
Dr. Sci.Tech., Professor, Pro-Rector on Research and Innovations of the Autonomous Municipal Educational.
Phone.: 8(846) 951-54-66.
E-mail: smimnauka@yandex.ru

The article states the necessity of using the multichannel principle within the invariant systems with the purpose of railway lines conditions classifying. The author elaborates the general structural scheme of the invariant railway line classifier, built upon the dual-channel principle.

Key words: *multichannel principle, dynamic links, perturbation action, invariance, multiterminal network, railway line.*

УДК 621.3

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

Молчанов Виктор Васильевич
Научно-производственное объединение «Омск-информационно-контрольные системы».
644551, Омская область, Омский район, Иртышский п., Восточная ул., д. 14.
Директор предприятия
Тел.: (812) 324-65-63

Шахов Владимир Григорьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и ситемы управления».
Тел.: (3812) 35-05-11

В статье рассмотрены вопросы повышения эксплуатационной надежности подвижного состава железных дорог. Приведены результаты моделирования железнодорожного транспорта как конвейерной системы. Рассмотрена новая система оперативного контроля и диагностирования подвижного состава, отличающаяся повышенной гибкостью и мобильностью.

Ключевые слова: *подвижной состав, диагностика, контроллер, надежность.*

Molchanov Victor Vasilevich
Research-and-production association «Omsk-information-control systems».
644551, the Omsk region, Omsk area, the Irtysh item, East street, д. 14.
The director of the enterprise.
Phone: (812 324-65-63.

Shahs Vladimir Grigorevich
Cand. Tech. Sci.,the senior lecturer of chair «Automatics and control systems».
Phone: (3812) 35-05-11.

The article is deal with the problem of increasing the operational reliability of rolling – stock. The modeling of railway transport as conveyor system is adduced. New heightened flexible and mobile rolling – stock efficient control and diagnostic system was observed.

Keywords: rolling – stock, diagnostic, controller, reliability.

УДК 620.9:005.93:502.174

КОНЦЕПЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ОАО «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»

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 предложена концепция выполнения в ОАО «Российские железные дороги» требований Федерального закона РФ № 261 от 23.11.2009 г. в части проведения обязательного энергетического обследования и разработки целевой программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Ключевые слова: *энергосбережение, энергоэффективность, энергетическое обследование, энергетический паспорт, программа энергосбережения.*

THE CONCEPT OF THE ORGANIZATION OF POWER INSPECTION OPEN SOCIETY «RUSSIAN RAILWAYS»

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 the performance concept in Open Society «Russian railways» of requirements of the Federal Law of the Russian Federation № 261 from 11/23/2009 regarding carrying out of obligatory power inspection and working out of the target program of power savings and increase of power efficiency is offered.

Keywords: *power savings; power efficiency; power inspection; the power passport; the power savings program*

УДК 621:658.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕНЕДЖМЕНТА ОАО «РЖД» С УЧЕТОМ ПОЛОЖЕНИЙ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ КАЧЕСТВА

Усманов Юрий Ахкемович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика железнодорожного транспорта и управление качеством».
Тел. (3812)31-06-48.
E-mail: eiuk@omgups.ru

Булахова Юлия Витальевна
Аспирант кафедры «Экономика железнодорожного транспорта и управление качеством», ОмГУПС.
Тел.: (3812)372-206.
E-mail: anade@bk.ru

В статье рассматриваются структурная реформа, проходящая в ОАО «РЖД»; предлагается новый взгляд на природу управления организацией на основе требований, указанных в международных стандартах; дается развернутый алгоритм действий для формирования политики в области качества как основного элемента результативного и эффективного управления производством.

Ключевые слова: *структурная реформа, железная дорога, управление производством, политика в области качества, стандарты, метод, требования*

SOME POTENTIAL DIMENSIONS FOR IMPROVEMENT IN MANAGEMENT OF THE OJSC «RUSSIAN RAILWAYS».

In this article are considered structural reform in the OJSC "Russian Railways"; suggests new point of view for the nature of management based upon the requirements from ISO; is given full-fledged scheme for development of useful and effective management.

Keywords: *structural reform, railway, industrial organization, quality policy, standards, method, requirements*

Usmanov Jurii Ahkemovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair « Economy of a railway transportation and quality management ».
Phone: (3812)31-06-48.
E-mail: eiuk@omgups.ru.

Bulahova Julia Vitalievna
Postgraduate of chair «Economy of a railway transportation and quality management», OSTU
Phone: (3812)372-206.
E-mail: anade@bk.ru

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

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»

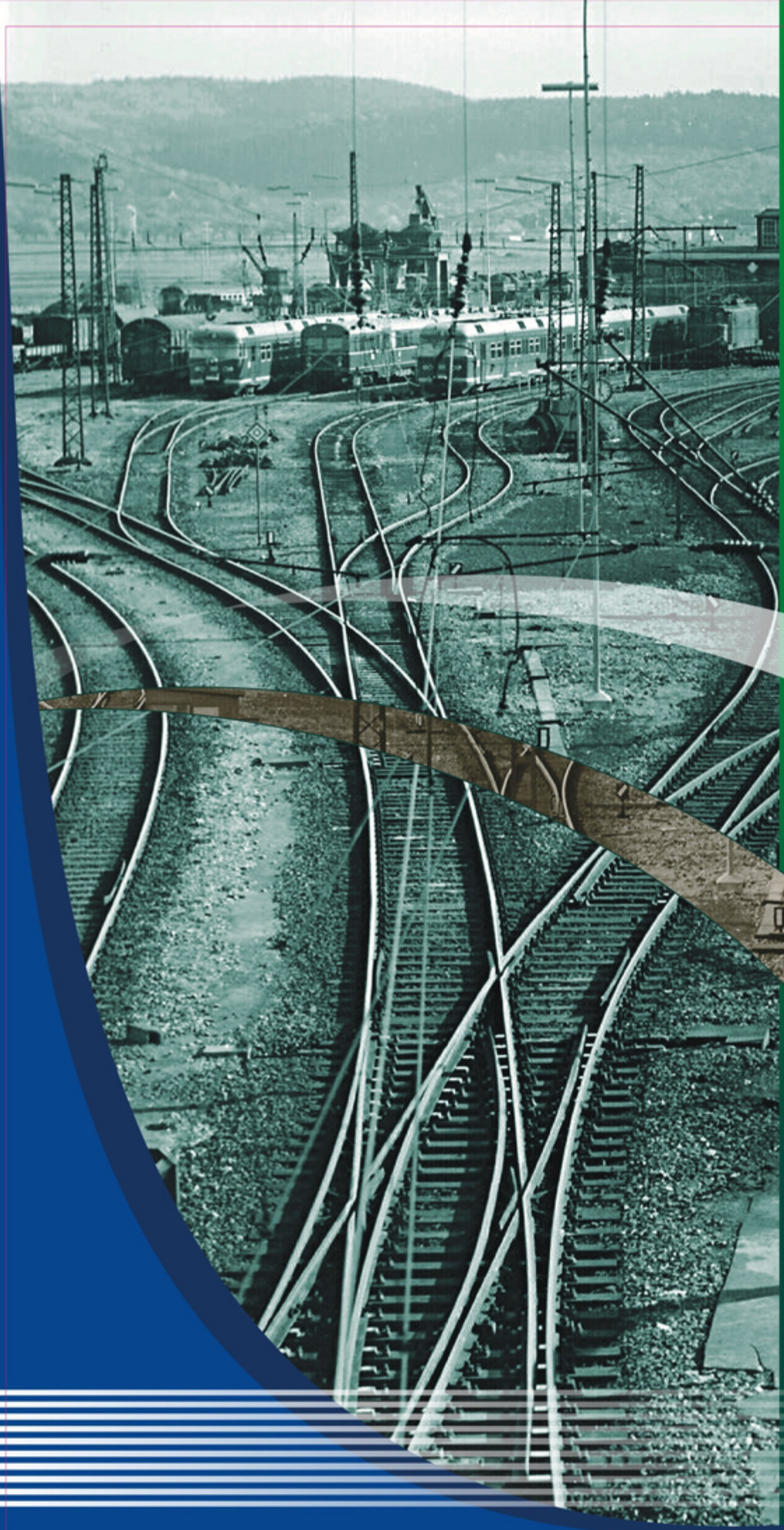
РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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);
Сафронов Эдуард Алексеевич – д.т.н., СибАДИ (Омск);
Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сидорова Елена Анатольевна – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сковородников Евгений Иванович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., ОмГУПС (Омск).

Редактор – Майорова Н. А.
Компьютерная верстка – Михалева С. С.

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.

Издание зарегистрировано в Международном центре ISSN – номер ISSN 2220-4245.

Адрес редакции: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел./факс: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 17.12.2010.
Тираж 500 экз.