

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство  
о регистрации СМИ  
ПИ №ФС 77-29963  
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:  
А.Г. Бабак, к.т.н.

#### Редакционный совет:

М.П. Бадёр, д.т.н., профессор,  
Л.А. Герман, д.т.н., профессор,  
В.Н. Дианов, д.т.н., профессор,  
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор,  
К.Л. Ковалёв, д.т.н., профессор,  
А.С. Космодамианский, д.т.н.,  
профессор,  
А.С. Мазнёв, д.т.н., профессор,  
Г.Г. Рябцев, д.т.н., профессор,  
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор,  
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор.

Выпускающий редактор:  
Н.А. Климчук.

#### Редакция:

140070, Московская область,  
Люберецкий район, п. Томилино,  
ул. Гаршина, д. 11.  
Тел./факс: (495) 500-40-20  
E-mail: npptez@mail.ru  
Сайт: www.npptez.ru

#### Подписано в печать:

\_\_\_12.2017 г.

#### Отпечатано:

ГУП МО «Коломенская типография».  
140400, г. Коломна,  
ул. III Интернационала, д. 2а.  
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60x90/8,  
бумага мелованная, объем 7 п.л.,  
тираж 1000 экз., заказ 1613

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

#### Баранов Л.А., Евсеев Д.Г.

Анализ методических погрешностей аналого-цифрового преобразования скорости движения подвижного состава при формировании виртуальных каналов. . . . . 2

#### Космодамианский А.С., Стрекалов Н.Н., Пугачев А.А.

Управление частотой коммутации для регулирования температуры тяговых полупроводниковых приборов. . . . . 7

#### Бадёр М.П., Лобынцев В.В., Дураков Д.Н., Динисилов А.С., Дожина Г.В., Бурсук В.И.

Разработка сглаживающего реактора фильтр-устройства тяговой подстанции постоянного тока с замкнутым магнитным потоком. . . . . 12

#### Иньков Ю.М., Глызин И.И.

Электрооборудование для высокоскоростных электропоездов перспективной системы электрической тяги. . . . . 17

#### Гречишников В.А., Шаламай И.В., Власов С.П., Куров Н.Д.

Расчёт мощности присоединения тяговых подстанций ОАО «РЖД» и метрополитенов. . . . . 21

#### Косарев Б.И., Косарев И.А.

Заземление металлических ограждений посадочных платформ на электрифицированных участках переменного тока. . . . . 26

#### Лисенков А.Н., Косарев А.Б.

О методологии многофакторного эксперимента в задачах исследования электротехнических устройств железнодорожного транспорта. . . . . 31

#### Сидоренко В.Г., Чжо М.А.

Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена. . . . . 37

#### Шевлюгин М.В., Зеленская И.В., Жуматова А.

Оценка потенциала ветровой электроэнергетики для использования в системе тягового электроснабжения железных дорог. . . . . 41

### ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

#### Алексеев В.М.

Информационно-диагностическая система контроля технического состояния инфраструктуры и подвижного состава метрополитена. . . . . 46

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Д.т.н., профессор Баранов Л.А.  
+7-495-684-22-88

Д.т.н., профессор Косарев Б.И.  
+7-499-154-89-90

Д.т.н., профессор  
Космодамианский А.С.  
+7-909-915-72-63

Д.т.н., профессор Лисенков А.Н.  
+7-916-570-80-43

Д.т.н., профессор Бадёр М.П.  
+7-495-684-22-87

Д.т.н., профессор Сидоренко В.Г.  
+7-916-217-50-76

Д.т.н., профессор Иньков Ю.М.  
+7-495-684-23-90

Д.т.н., доцент Шевлюгин М.В.  
+7-916-528-67-68

Д.т.н., доцент Гречишников В. А.  
+7-916-625-43-03

Д.т.н., профессор Алексеев В.М.  
+7-926-277-92-28

# Анализ методических погрешностей аналого-цифрового преобразования скорости движения подвижного состава при формировании виртуальных каналов

// Analysis of method error of analog-to-digital conversion of the motion speed of rolling stock by formation of logical link //

**Баранов Л.А., д. т. н., профессор,  
Евсеев Д.Г., д. т. н.,  
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва**

*В статье приведен анализ статических и динамических методических погрешностей аналого-цифрового преобразования скорости движения подвижного состава с частотно-импульсными датчиками угловой скорости вращения колесной пары. Рассмотрен способ уменьшения статических погрешностей преобразования. Доказана возможность уменьшения динамических погрешностей аналого-цифрового преобразования скорости за счет введения виртуальных каналов преобразования. Получены аналитические выражения для расчета методических погрешностей аналого-цифрового преобразования при детерминированных и стохастических моделях входного сигнала. Использование виртуальных каналов в алгоритмах аналого-цифрового преобразования скорости позволяет находить компромисс между статическими и динамическими погрешностями, что обеспечивает эффективное функционирование трактов измерения скорости в системах управления, диагностики и обеспечения безопасности движения подвижного состава. **Ключевые слова:** аналого-цифровое преобразование, скорость движения, частотно-импульсный модулятор, угловая скорость, статическая методическая погрешность, динамическая погрешность, модель сигнала, автокорреляционная функция сигнала, виртуальные каналы преобразования, уменьшение статистических и динамических погрешностей, расчет оценок погрешностей.*

*The analysis of statistical and dynamic method error of analog-to-digital conversion of the motion speed of the rolling stock with pulse-frequency sensors of rotational speed of mounted wheels was given. There was considered the method of statistical error reduction of conversion. The possibility of dynamic error of reduction analog-to-digital conversion of the speed by virtue of integration of logical link of conversion was proved. There were received the analytical expressions for calculation of method error of analog-to-digital conversion by determine and stochastic models of incoming signal. The using of logical link in methods of analog-to-digital conversion of the motion speed make possible to strike a happy medium between statistical and dynamic error which run effectively tracts of speed measurement in the management, diagnostic and railroad traffic safety systems. **Keywords:** analog-to-digital conversion, motion speed, pulse-frequency modulator, rotational speed, statistical methodic error, model of the signal, autocorrelation function of signal, logical link of conversion, reduction of statistical and dynamic error, calculation of error estimates.*

Автоматизация процесса управления поездом, обеспечение безопасности движения и минимизация расхода энергии на тягу при использовании современных микропроцессорных систем непосредственно связаны с требованиями повышения точности

аналого-цифрового преобразования скорости движения [1]. В системах автоматического управления движением погрешность измерения скорости непосредственно влияет на качество работы регулятора времени хода, составной частью которого является система

регулирования скорости, на точность прицельной остановки и эффективность торможения. В свою очередь, увеличение времени прицельного торможения, которое зависит от эффективности торможения, при заданном времени хода поезда по перегону увеличивает расход энергии на тягу. В условиях метрополитена дополнительное увеличение времени торможения на одну секунду приводит к перерасходу энергии на тягу по перегону на величину порядка 1%. Погрешность в измерении скорости непосредственно связана с эффективностью использования пропускной способности линии (участка), так как величины допустимых скоростей движения должны выбираться с запасом, учитывающим точность измерения скорости. В частности, при использовании современных систем обеспечения безопасности движения с радиоканалом (типа СВТС) величина защитного промежутка, непосредственно влияющего на допустимый минимальный интервал попутного следования, однозначно связана с погрешностями измерения координат и скорости поезда [2].

Широкое использование находит аналого-цифровое преобразование скорости при первичном датчике – частотно-импульсном модуляторе угловой скорости вращения колесной пары [1]. Пусть  $z$  – число импульсов на один оборот колесной пары. Тогда за время  $\tau$  между передними фронтами следующих один за другим импульсов будет пройден путь  $S_0 = \frac{2\pi R}{z}$ , где  $R$  – радиус колесной пары. Если за фиксированное время  $T$  на сумматор поступают  $N$  импульсов (рис. 1а), то

$$T = N\tau - \Delta t_1 + \Delta t_2. \quad (1)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{\Delta t_1}{\tau} = \delta_1; \quad \frac{\Delta t_2}{\tau} = \delta_2; \quad \frac{1}{\tau} = f.$$

С учетом этих обозначений

$$Tf = N - \delta_1 + \delta_2, \quad (2)$$

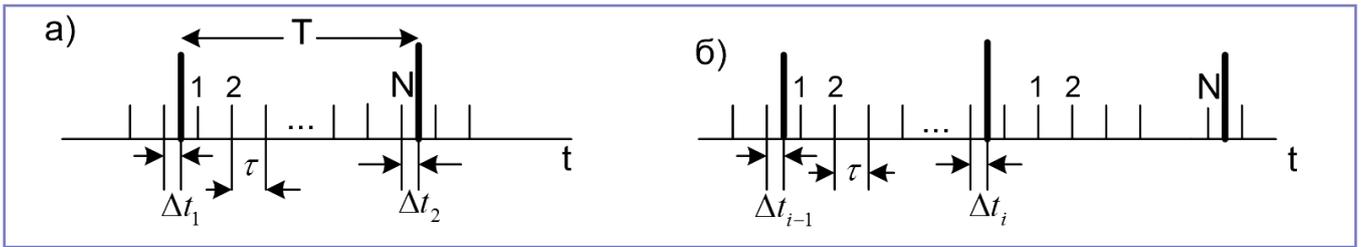


Рис. 1. Преобразование «Частота – цифра»

где  $0 \leq \delta_1 \leq 1$ ;  $0 \leq \delta_2 \leq 1$ ;  $-1 \leq \delta_1 - \delta_2 \leq 1$ .

При измерении скорости  $V$  в установившемся режиме  $V = const$ , период следования импульсов  $\tau = \frac{S_0}{V}$ , и, как следует из (2),

$$V = \frac{S_0 N}{T} + (\delta_2 - \delta_1) \frac{S_0}{T}, \quad (3)$$

$$N = E \left[ (T + \Delta t_1) \frac{V}{S_0} \right], \quad (4)$$

где  $E$  – знак, определяющий операцию выделения целой части числа, полученного при вычислении по формуле, заключенной в квадратных скобках.

Измеренное значение скорости определяется как

$$V_{изм} = \frac{N \cdot S_0}{T}. \quad (5)$$

Следовательно, методическая статическая погрешность определяется выражением

$$\Delta V_{CT} = V - V_{изм} = (\delta_2 - \delta_1) \frac{S_0}{T}. \quad (6)$$

Так как  $-1 \leq \delta_2 - \delta_1 \leq 1$ , то значения статической методической погрешности находятся в диапазоне  $\pm \frac{S_0}{T} = q$ , где  $q$  – шаг квантования по уровню.

Выражение  $\Delta V_{CT}$  с учетом (4), (5), (6) можно представить в виде

$$\Delta V_{CT} = V - qE \left[ \frac{V}{q} + \delta_1 \right]. \quad (7)$$

Сравнивая (6) и (7), получаем

$$(\delta_2 - \delta_1)q = V - qE \left[ \frac{V}{q} + \delta_1 \right],$$

откуда

$$\delta_2 = \frac{V}{q} - E \left[ \frac{V}{q} + \delta_1 \right] + \delta_1. \quad (8)$$

Последнее выражение устанавливает функциональную связь между  $\delta_2$ ,  $V$  и  $\delta_1$ . В [3] получен закон распределения плотности вероятности этой погрешности измерения скорости при случайных величинах  $V$  и  $\delta_1$ . Доказано, что математическое ожидание методической статической погрешности  $\Delta V_{CT}$  равно 0, а среднеквадратическое значение погрешности  $\sqrt{\Delta V_{CT}^2}$  при условии, что дисперсия изменения скорости  $\overline{V^2}$  намного больше  $q^2$ , равно  $\frac{q}{\sqrt{6}}$ . Уменьшение методической статической погрешности при фиксированном времени измерения  $T$

достигается преобразованием временных интервалов  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  в цифровой эквивалент с дальнейшим вычислением скорости [1]. Учитывая, что временная дискретизация осуществляется последовательно с шагом  $T$  (рис. 1б), величина  $\Delta t_1 = \Delta t_{i-1}$  – отрезок времени между последним суммируемым импульсом  $(i-1)$ -го временного интервала  $T$  и его окончанием, а  $\Delta t_2 = \Delta t_i$  – отрезок времени между последним суммируемым импульсом  $i$ -го временного интервала  $T$  и его окончанием, получаем

$$V_{изм} = \frac{S_0 N}{T - E \left[ \frac{\Delta t_i}{\tau_r} + \delta_1' \right] \tau_r + E \left[ \frac{\Delta t_{i-1}}{\tau_r} + \delta_2' \right] \tau_r}, \quad (9)$$

где  $\frac{1}{\tau_r} = f_r$  – частота высокочастотного генератора, используемого для преобразования временных интервалов  $\Delta t_i$  и  $\Delta t_{i-1}$  в цифровой эквивалент;  $\delta_1'$  и  $\delta_2'$  – погрешности этого преобразования, которые находятся в диапазоне от 0 до 1;  $E$  – операция вычисления целой части выражения в квадратных скобках.

При этом способе преобразования достаточно использовать один уровень прерывания в вычислительном устройстве. Методическая статическая погрешность измерения скорости определяется выражением

$$\Delta V = \frac{S_0 N}{T - \Delta \tau_i + \Delta \tau_{i-1}} - V_{изм}. \quad (10)$$

Можно показать [1], что  $\Delta V$  находится в диапазоне  $\pm \frac{\tau_r T}{T} V$ .

Рассмотренные способы преобразования «Частота – цифра» не единственные. В монографии [1] приведен анализ различных способов. Вместе с тем достоинством рассмотренных выше способов является постоянный шаг

временной дискретизации  $T$ , позволяющий синхронизировать измерительный тракт с управляющим вычислительным устройством. Анализ статических инструментальных погрешностей, методы расчета этих погрешностей приведены в [1].

Динамические погрешности преобразования определяются тем, что результатом измерения при изменяющейся во времени  $t$  скорости  $V(t)$  является ее среднее значение за время измерения. Если пренебречь погрешностью квантования по уровню и считать цифровой эквивалент измеренной скорости  $V_{изм}$  в моменты  $t = nT$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , считая, что на временном отрезке  $(n-1)T \leq t < nT$ , величина  $V_{изм}[nT] = const$ , то

$$V_{изм}[(n+\varepsilon)T] = V_{изм}[nT] = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} V(t) dt, \quad (11)$$

где  $t = (n + \varepsilon)T$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ .

Моделью такого преобразования [1] является разомкнутая импульсная система, представленная на рис. 2.

Звено с передаточной функцией

$$K_1(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{pT} \quad (12)$$

реализует оператор усреднения

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V(t) dt.$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) этого звена определяется выражением

$$K_1(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega T} = \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} e^{-j\frac{\omega T}{2}}, \quad (13)$$

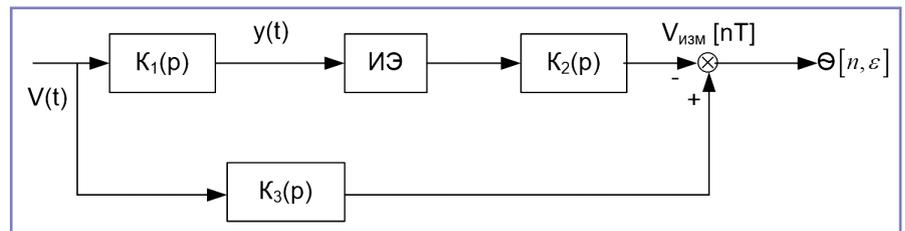


Рис. 2. Модель преобразования

откуда следует, что это звено является фильтром нижних частот, вносящим запаздывание на  $\frac{T}{2}$ . Идеальный импульсный элемент осуществляет временную дискретизацию с шагом  $T$ . На его выходе – решетчатая функция – последовательность  $\delta$ -функций с весами  $y[nT]$ . Звено  $K_2(p)$  – экстраполятор нулевого порядка (ЭНП), осуществляющий ступенчатое восстановление дискретизированного сигнала. Его передаточная функция и АФЧ определяются выражениями

$$K_2(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p}, \quad (14)$$

$$K_2(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega} = \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} e^{-j \frac{\omega T}{2}}. \quad (15)$$

Как следует из (15), ЭНП вносит запаздывание на  $\frac{T}{2}$ . На выходе модели получаем сигнал  $V_{изм}[nT]$  (рис. 3).

Звено, передаточная функция которого

$$K_3(p) = e^{-p\varphi T}, \quad (16)$$

вносит запаздывание на  $\varphi T$ . Введение этого звена [1] объясняется следующим. Если результат преобразования используется в системах управления и (или) обеспечения безопасности движения, когда нельзя исключить погрешность от запаздывания, то  $\varphi = 0$ . В том случае, когда  $V_{изм}[nT]$  используется для записи траектории движения подвижного состава, погрешность от запаздывания может быть исключена, и  $\varphi T$  равна сумме запаздывания в звеньях  $K_1(p)$  и  $K_2(p)$ :

$$\varphi T = \frac{T}{2} + \frac{T}{2} = T.$$

Динамическая погрешность преобразования, как следует из рис. 2, определяется выражением

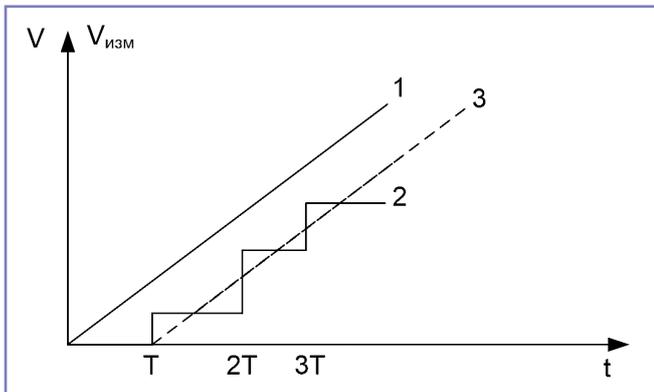


Рис. 3. Зависимости  $V(t)$ ,  $V_{изм}[nT]$ :  
1 – функция  $V(t)$ ; 2 – функция  $V_{изм}[nT]$ ; 3 – функция  $V(t-T)$

$$\Theta[n, \varepsilon] = V[(n+\varepsilon)T - \varphi T] - V_{изм}[nT]. \quad (17)$$

Сигнал на выходе импульсной системы определяется выражением

$$V_{изм}[nT] = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} V(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V[nT - \tau] d\tau. \quad (18)$$

Рассмотрим случай равноускоренного движения с максимальным ускорением  $a_{max}$ . При  $\varphi = 0$ , когда погрешность от запаздывания не исключается,

$$\Theta[n, \varepsilon] = a_{max}(n+\varepsilon)T - \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} a_{max} t dt = a_{max} T \left( \varepsilon + \frac{1}{2} \right). \quad (19)$$

Как следует из (19), максимальное значение динамической погрешности соответствует  $\varepsilon = 1$  и

$$\Theta_{max} = \frac{2}{3} a_{max} T. \quad (20)$$

При исключении погрешности от запаздывания

$$\Theta[n, \varepsilon] = \begin{cases} 0 & \text{при } n=0 \\ a_{max} T \left( \varepsilon - \frac{1}{2} \right) & \text{при } n > 0 \end{cases}$$

$$\Theta_{max} = \frac{1}{2} a_{max} T. \quad (21)$$

Таким образом, при равноускоренном движении динамическая погрешность линейно растет с увеличением шага временной дискретизации  $T$ .

Пусть  $a_{max} = 1,2 \text{ м/с}^2$ ,  $T = 0,1 \text{ с}$ . При использовании тракта преобразования в системах управления  $\varphi = 0$  и  $\Theta_{max} = 0,12 \text{ м/с} = 0,432 \text{ км/ч}$ ; при  $T = 0,5 - \Theta_{max}$  уже  $2,16 \text{ км/ч}$ .

Следовательно, вопрос уменьшения динамических погрешностей является актуальным. Уменьшение

динамических погрешностей путем уменьшения  $T$  приводит к росту статических погрешностей квантования. Компромисс между статическими и динамическими погрешностями может быть достигнут использованием виртуальных измерительных каналов [1]. Пусть микропроцессорное устройство вычисляет измеренное значение скорости (рис. 4): по первому каналу – за время  $T$  от  $(n-1)T$  до  $nT$ ; по второму каналу – за время  $T$  от  $(n-1 + \frac{1}{k})T$  до  $(n + \frac{1}{k})T$ , где  $k$  – число каналов; по  $i$ -му каналу – за время  $T$  от  $(n-1 + \frac{i-1}{k})T$  до  $(n + \frac{i-1}{k})T$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, k-1$ ; по последнему  $k$ -му каналу – за время  $T$  от  $(n-1 + \frac{k-1}{k})T$  до  $(n + \frac{k-1}{k})T$ . Измеренные значения скорости последовательно по времени поступают на восстанавливающее устройство – экстраполятор нулевого порядка. Рассматриваемые  $k$ -каналы являются виртуальными. Они реализуются соответствующей программой микропроцессорного устройства, обрабатывающего последовательность импульсов частотно-импульсного датчика (рис. 4, где  $k = 3$ ). Модель преобразования  $V(t)$  в  $V_{изм}(t)$  аналогична показанной на рис. 2.

Отличие заключается в том, что такт идеального импульсного элемента равен  $\frac{T}{k}$ , а передаточная функция экстраполятора нулевого порядка

$$K_2(p) = \frac{1 - e^{-p \frac{T}{k}}}{p}.$$

В этом случае запаздывание, вносимое ЭНП, равно  $\frac{T}{2k}$ . Так как время

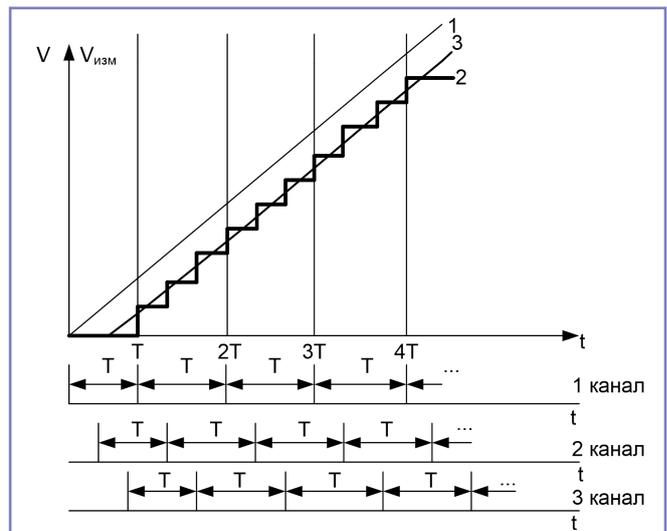


Рис. 4. Временная диаграмма преобразования  $V(t)$  в  $V_{изм}[n \frac{T}{k}]$  при числе виртуальных каналов  $k = 3$ :  
1 – функция  $V(t)$ ; 2 – функция  $V_{изм}[n \frac{T}{k}]$ ; 3 – функция  $V(t - \frac{T}{2k})$

суммирования импульсов частотно-импульсного датчика остается равным  $T$ , статическая погрешность не увеличивается. Динамическая погрешность уменьшается за счет того, что шаг временной дискретизации при использовании  $k$  виртуальных каналов уменьшается в  $k$  раз. Итак,

$$V_{изм} \left[ n \frac{T}{k} \right] = \frac{1}{T} \int_0^T V \left[ n \frac{T}{k} - \tau \right] d\tau, \quad (22)$$

$$\theta \left[ n, \varepsilon \right] = V \left[ (n+\varepsilon) \frac{T}{k} - \varphi T \right] - V_{изм} \left[ n \frac{T}{k} \right], \quad (23)$$

где  $t = (n+\varepsilon) \frac{T}{k}$ .

Рассмотрим снова погрешность в случае равноускоренного движения при  $\varphi = 0$ :

$$\begin{aligned} \theta \left[ n, \varepsilon \right] &= a_{\max} (n+\varepsilon) \frac{T}{k} - \\ &- \frac{1}{T} \int_0^T a_{\max} \left( n \frac{T}{k} - \tau \right) d\tau = \\ &= a_{\max} T \left( \frac{\varepsilon}{k} + \frac{1}{2} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\text{и } \theta_{\max} = a_m T \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{k} \right). \quad (25)$$

При  $k = 1$  выражение (25) совпадает с (20). С увеличением числа виртуальных каналов  $\theta_{\max}$  уменьшается. Так, при  $k = 3$  величина

$$\theta_{\max} = \frac{5}{6} a_{\max} T.$$

Если погрешность от запаздывания исключена,

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2k} = \frac{1}{2k} (k-1)$$

и динамическая погрешность измерения скорости определяется выражением

$$\theta \left[ n, \varepsilon \right] = \begin{cases} 0 & \text{при } (n+\varepsilon) \frac{T}{k} < \frac{1}{2} (k+1) \frac{T}{k} \\ Q \max \left[ (n+\varepsilon) \frac{T}{k} - \frac{1}{2} (k+1) \frac{T}{k} \right] - \\ - \frac{1}{T} \int_0^T a_{\max} \left( n \frac{T}{k} - \tau \right) d\tau & \\ \text{при } (n+\varepsilon) \frac{T}{k} \geq \frac{1}{2} (k+1) \frac{T}{k} \end{cases} \quad (26)$$

После несложных преобразований получаем

$$\theta \left[ n, \varepsilon \right] = \begin{cases} 0 & \text{при } (n+\varepsilon) < \frac{1}{2} (k+1) \\ \frac{a_m T}{k} \left( \varepsilon - \frac{1}{2} \right) & \\ \text{при } (n+\varepsilon) \geq \frac{1}{2} (k+1) \end{cases}, \quad (27)$$

откуда следует, что при  $\varphi \neq 0$  и равноускоренном движении

$$\theta_{\max} = \frac{a_{\max} T}{2k}. \quad (28)$$

При  $k = 1$  выражение (28) совпадает с (21). Таким образом, использование

виртуальных каналов  $k > 1$  уменьшает динамическую погрешность измерения скорости.

Далее перейдем к анализу динамических погрешностей при описании функции  $V(t)$  случайным стационарным процессом. Такая модель эффективна при анализе погрешностей в режиме стабилизации скорости. Пусть поезд движется со скоростью

$$V(t) = V_0 + \Delta V(t),$$

где  $\Delta V(t)$  – случайная стационарная функция с нулевым математическим ожиданием, определяемая возмущениями, действующими на поезд, и динамикой системы управления скоростью. Зададим  $\Delta V(t)$  ее автокорреляционной функцией  $R_{\Delta v \Delta v}(\tau)$ .

При такой модели  $\Delta V(t)$  требуется вычислить среднеквадратическую погрешность измерения скорости.

Дисперсия погрешности измерения скорости (рис. 2) определяется выражением

$$\begin{aligned} \overline{\theta^2} [0, \varepsilon] &= M \left\{ \left[ \Delta V \left[ (n+\varepsilon) \frac{T}{k} \right] - \right. \right. \\ &\left. \left. - \Delta V_{изм} \left[ n \frac{T}{k} \right] \right]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (29)$$

где  $M$  – знак математического ожидания выражения в фигурных скобках.

Используя методику, приведенную в [3], получим

$$\begin{aligned} \overline{\theta^2} [0, \varepsilon] &= R_{\Delta v \Delta v} (0) - \\ &- 2 \frac{1}{T} \int_0^T R_{\Delta v \Delta v} \left[ \left( \varepsilon - \varphi k \right) \frac{T}{k} + \tau \right] d\tau + \\ &+ \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T R_{\Delta v \Delta v} (\tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \end{aligned} \quad (30)$$

Зависимость дисперсии от  $\varepsilon$  говорит о нестационарности случайной функции погрешности. Следуя [4] и [5], определим относительное значение дисперсии погрешности

$$\begin{aligned} \overline{\delta^2} [0, \varepsilon] &= \frac{\overline{\theta^2} [0, \varepsilon]}{R_{\Delta v \Delta v} (0)} = \\ &= 1 - \frac{2}{TR_{\Delta v \Delta v} (0)} \int_0^T R_{\Delta v \Delta v} \left[ \left( \varepsilon - \varphi k \right) \frac{T}{k} + \tau \right] d\tau + \\ &+ \frac{1}{R_{\Delta v \Delta v} (0) T^2} \int_0^T \int_0^T R_{\Delta v \Delta v} (\tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \end{aligned} \quad (31)$$

В качестве оценки динамической погрешности измерения используем максимальное относительное значение среднеквадратического отклонения погрешности (СКО), обозначив его как  $\sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}}$ . Как следует из (31), дисперсия погрешности максимальна при  $\varepsilon = 1$ , откуда

$$\sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}} = \sqrt{\overline{\delta^2} [0, \varepsilon = 1]}. \quad (32)$$

Следуя [4], после разложения в ряд Маклорена функции  $R_{\Delta v \Delta v}(\tau)$  и подстановки в (31) получаем значение относительной погрешности преобразования:

• для дифференцируемых случайных процессов:

$$\begin{aligned} \overline{\theta^2} [0, \varepsilon] &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R_{\Delta v \Delta v}^{(2i)} (0)}{(2i)! R_{\Delta v \Delta v} (0)} \times \\ &\times T^{2i} \left\{ \left[ -\frac{2}{2i+1} \left[ 1 + \frac{\varepsilon}{k} - \varphi \right]^{2i+1} - \left( \frac{\varepsilon}{k} - \varphi \right)^{2i+1} \right] + \right. \\ &\left. + \frac{2}{(2i+1)(2i+2)} \right\} \frac{1}{R_{\Delta v \Delta v} (0)}, \end{aligned} \quad (33)$$

• для недифференцируемых случайных процессов:

$$\begin{aligned} \overline{\theta^2} [0, \varepsilon] &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{R_{\Delta v \Delta v}^{(i)} (0)}{(i)! R_{\Delta v \Delta v} (0)} \times \\ &\times \left\{ -\frac{2}{T} \int_0^T \left( \varepsilon - \varphi k \right) \frac{T}{k} + \tau \right\} d\tau + \\ &+ \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T \tau_1 - \tau_2 \left\{ d\tau_1 d\tau_2 \right\}, \end{aligned} \quad (34)$$

где  $R_{\Delta v \Delta v}^{(i)} (0)$ ,  $R_{\Delta v \Delta v}^{(2i)} (0)$  – значения  $(i)$ -й и  $(2i)$ -й производных автокорреляционной функции при нулевом аргументе.

При вычислении максимальной относительной СКО погрешности измерения, не превышающей 15–17%, достаточно использовать в (33) и (34) только главный член ряда при  $\varepsilon = 1$ .

Для дифференцируемого случайного процесса

$$\begin{aligned} \sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}} &\approx \sqrt{\frac{1}{R_{\Delta v \Delta v} (0)} \frac{R_{\Delta v \Delta v}^2 (0)}{2}} \times \\ &\times T^2 \left\{ -\frac{2}{3} \left[ \left( 1 + \frac{1}{k} \right)^3 - \left( \frac{1}{k} \right)^3 \right] + \frac{1}{6} \right\} \\ &\text{при } \varphi = 0; \\ \sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}} &\approx \sqrt{\frac{1}{R_{\Delta v \Delta v} (0)} \frac{R_{\Delta v \Delta v}^2 (0)}{2}} \times \\ &\times T^2 \left\{ -\frac{2}{3} \left[ \left( 1 + \frac{1}{2k} \right)^3 - \left( \frac{1}{2k} - \frac{1}{2} \right)^3 \right] + \frac{1}{6} \right\} \\ &\text{при } \varphi \neq 0. \end{aligned}$$

Рассмотрим ряд примеров. Пусть  $R_{\Delta v \Delta v}(\tau) = G_{\Delta v}^2 \frac{\sin \omega_0 \tau}{\omega_0 \tau}$  – случайный процесс с постоянной спектральной плотностью мощности в полосе от 0 до  $\omega_0$  и равный 0 вне этой полосы. Тогда

$$\begin{aligned} \sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}} &\approx \sqrt{-\frac{(\omega_0 T)^2}{6} \left\{ -\frac{2}{3} \left[ \left( 1 + \frac{1}{k} \right)^3 - \left( \frac{1}{k} \right)^3 \right] + \frac{1}{6} \right\}} \\ &\text{при } \varphi = 0; \\ \sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}} &\approx \sqrt{-\frac{(\omega_0 T)^2}{6} \left\{ -\frac{2}{3} \left[ \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2k} \right)^3 - \left( \frac{1}{2k} - \frac{1}{2} \right)^3 \right] + \frac{1}{6} \right\}} \\ &\text{при } \varphi \neq 0. \end{aligned}$$

При отсутствии виртуальных каналов  $k = 1$

$$\begin{aligned} \sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}} &= 0,866 \omega_0 T \text{ при } \varphi = 0; \\ \sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}} &= 0,289 \omega_0 T \text{ при } \varphi \neq 0. \end{aligned}$$

При  $k = 4$  виртуальных каналах

$$\sqrt{\overline{\delta^2}_{\max}} = 0,434 \omega_0 T \text{ при } \varphi = 0;$$

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} = 0,072\omega_0 T \text{ при } \varphi \neq 0.$$

Если спектральная плотность мощности случайного процесса убывает с ростом частоты и автокорреляционная

функция имеет вид  $R_{\Delta v \Delta v}(\tau) = G_{\Delta v}^2 e^{-\alpha^2 \tau^2}$ , то

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} \approx \sqrt{-(\alpha T)^2 \left\{ -\frac{2}{3} \left[ \left(1 + \frac{1}{k}\right)^3 - \left(\frac{1}{k}\right)^3 \right] + \frac{1}{6} \right\}}$$

при  $\varphi = 0$ ;

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} \approx \sqrt{-(\alpha T)^2 \left\{ -\frac{2}{3} \left[ \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2k}\right)^3 - \left(\frac{1}{2k} - \frac{1}{2}\right)^3 \right] + \frac{1}{6} \right\}}$$

при  $\varphi \neq 0$ .

При отсутствии виртуальных каналов  $k = 1$

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} = 2,121\alpha T \text{ при } \varphi = 0;$$

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} = 0,7079\alpha T \text{ при } \varphi \neq 0.$$

При  $k = 4$  виртуальных каналах

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} = 1,063\alpha T \text{ при } \varphi = 0,$$

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} = 0,1764\alpha T \text{ при } \varphi \neq 0.$$

Для недифференцируемого случайного процесса с убывающей при увеличении частоты спектральной плотности мощности и автокорреляционной функцией  $R_{\Delta v \Delta v} = \delta_{\Delta v}^2 e^{-\alpha^2 \tau^2}$  выражения оценок погрешности имеют вид

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} \approx \sqrt{\alpha T \left[ \left(\frac{2}{k} + 1\right) - \frac{1}{3} \right]} \text{ при } \varphi = 0;$$

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} \approx \sqrt{\alpha T \left[ \left(\frac{k-1}{2k}\right)^2 + \left(\frac{k+1}{2k}\right)^2 - \frac{1}{3} \right]} \text{ при } \varphi \neq 0.$$

При отсутствии виртуальных каналов  $k = 1$

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} \approx 1,63\sqrt{\alpha T} \text{ при } \varphi = 0;$$

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} \approx 0,82\sqrt{\alpha T} \text{ при } \varphi \neq 0.$$

При  $k = 4$  виртуальных каналах

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} \approx 1,08\sqrt{\alpha T} \text{ при } \varphi = 0;$$

$$\sqrt{\delta_{\max}^2} \approx 0,44\sqrt{\alpha T} \text{ при } \varphi \neq 0.$$

Следовательно, использование виртуальных каналов позволяет при фиксированном времени преобразования  $T$  уменьшить динамическую погрешность.

## Выводы

1. Описан способ уменьшения методических статических погрешностей аналого-цифрового преобразования скорости движения подвижного состава за счет уменьшения шага квантования по уровню при фиксированном временном интервале преобразования «Частота – цифра».

2. Описан способ уменьшения методических динамических погрешностей аналого-цифрового преобразования скорости движения подвижного состава за счет формирования виртуальных каналов.

3. Представлены методы расчета оценок динамических погрешностей аналого-цифрового преобразования скорости подвижного состава при детерминированных и стохастических моделях преобразуемого сигнала.

4. Получены аналитические выражения, позволяющие для различных условий синтезировать параметры тракта аналого-цифрового преобразования скорости подвижного состава.

## Литература

1. Баранов Л.А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов. Под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
2. Баранов Л.А. Оценка интервала попутного следования поездов метрополитена для систем безопасности на базе радиоканала // Мир транспорта. № 2, 2015. – С. 6–14.
3. Баранов Л.А. Статические погрешности преобразования частоты и временных интервалов в код / Баранов Л.А. // Метрология. № 7, 1974. – С. 29–37.
4. Баранов Л.А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
5. Баранов Л.А., Яцкова Т.А. Оценки погрешности и помехоустойчивости тракта аналого-цифрового преобразования в системах автоматического контроля и управления // Электроника и электрооборудование транспорта. № 6, 2016. – С. 17–23.

### Баранов Леонид Аврамович

Родился в 1936 году. В 1959 году окончил Московский институт инженеров транспорта по специальности «Инженер – электромеханик путей сообщения». В 1966 году защитил кандидатскую диссертацию, в 1974 году – докторскую диссертацию по теме «Исследование точности и помехоустойчивости телемеханических и дистанционных систем с импульсной модуляцией (Теория, разработка систем и их применение на железнодорожном транспорте)». В настоящее время заведующий кафедрой «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ). Имеет более 350 науч-

ных трудов, в том числе монографии, авторские свидетельства и патенты. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат Премии Правительства РФ.

### Евсеев Дмитрий Геннадиевич

Родился в 1938 году. В 1961 году окончил Саратовский политехнический институт. Доктор технических наук. В 1975 году защитил докторскую диссертацию по теме «Управление формированием свойств поверхностных слоев закаленных деталей при абразивной обработке». В настоящее время профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта (МИИТ). Имеет более 200 научных трудов, в том числе монографии, авторские свидетельства и патенты. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии совета Министров СССР.

### Baranov Leonid

Was born in 1936. In 1959 graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a specialization in «Electrical engineer of means of communication». In 1966 he defended his candidate thesis, in 1974 he defended his doctoral thesis «Investigation of accuracy and noise immunity of SCADA and remote systems with pulse modulation (Theory, development of systems and their application on railway transport)». At the present time – head of department «Management and protection of information», Russian University of Transport. Has more than 350 scientific works, including monographs, certificates of authorship and patents. Honored scientist of Russia, laureate of Government Prize of the Russian Federation.

### Evseev Dmitry

He was born in 1938. In 1961 he graduated from Saratov Polytechnic Institute. He is Doctor of Technical Sciences. In 1975 he defended his doctoral thesis on «Control of the generation of properties of surface layers of hardened workpieces in abrasive processing». At present he is a professor at the Department of Transport Engineering and Rolling Stock Repair at the Russian University of Transport (MIIT). He has more than 200 scientific works, including monographs, author's certificates and patents. He is Honored Scientist of Russia, Award Holder of the Council of Ministers of the USSR.

# Управление частотой коммутации для регулирования температуры тяговых полупроводниковых приборов

// Switching frequency management for temperature control of traction semiconductor devices //

Космодамианский А.С., д. т. н., профессор,  
Стрекалов Н.Н.,  
РУТ (МИИТ), Москва

Пугачев А.А., к. т. н., доцент,  
Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Представлен краткий обзор способов охлаждения силовых полупроводниковых приборов тяговых преобразователей частоты. Отражены преимущества и недостатки применяемых технических и схемных решений, предложены рекомендации по их совершенствованию без значительных изменений конструктивных особенностей. Рассмотрены дополнительные варианты регулирования температуры по отношению к уже существующим на тяговом подвижном составе. Предложена система регулирования температуры, применяющая в качестве регулирующего воздействия частоту коммутации полупроводниковых ключей и работающая по отклонению от заданного среднего значения температуры. Представлены результаты моделирования в MATLAB.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, температура, система охлаждения, потери мощности, частота коммутации, моделирование.

Анализ исследований [1, 2] показывает, что основные повреждения силовых полупроводниковых приборов при импульсных тепловых нагрузках обусловлены процессами термомеханического старения припоев, повреждениями контактов между силовыми полупроводниковыми приборами и охладителями, вызываемыми значительными колебаниями температуры при нерегулируемом охлаждении. С температурой силовых полупроводниковых приборов и тяговых полупроводниковых преобразовательных установок и характером ее изменения непосредственно связаны их показатели надежности – интенсивность отказов и циклоустойкость. Кроме этого, тепловое

The brief survey of techniques of traction frequency converters power semiconductor devices cooling is presented. The advantages and drawbacks of technical approaches and schematic solutions applied nowadays are highlighted, the suggestions for its improvements without significant interventions into design and topology are proposed. The additional techniques to control semiconductors temperature of frequency converters of traction rolling stock are laid out. The temperature control system with using of semiconductors frequency switching as a regulatory reference and applying of deviation of semiconductor temperature from the reference on average temperature is developed and investigated. The results of simulation in MATLAB are shown and discussed.

**Keywords:** frequency converter, temperature, cooling system, power losses, switching frequency, simulation.

состояние преобразователя также может влиять на режимы работы системы управления электропривода [3]. Таким

образом, стабилизация температурных режимов необходима для повышения надежности тяговых полупроводниковых преобразовательных установок и их систем охлаждения, а также уменьшения затрат энергии на охлаждение [4, 5].

Отведение от полупроводниковых приборов тепловой мощности, достигающей сотен ватт и даже нескольких киловатт, осуществляется системой охлаждения, в которую входят охладитель и охлаждающая среда. В качестве охлаждающей среды используются воздух, вода или другая жидкость. Способы охлаждения полупроводниковых приборов разнообразны и могут основываться на их прямом (непосредственном) взаимодействии с внешней охлаждающей средой или на применении промежуточного контура с теплоносителем. Способы охлаждения силовых полупроводниковых элементов по методу действия разделяют на пассивный и активный. Для первого характерен естественный путь отвода тепла при помощи конвекции, теплопроводности и излучения, а для второго – принудительный теплоотвод с применением вентиляторов, омывающих жидкостей, термоэлектроохладителей и др. Наиболее общая классификация методов охлаждения показана на рис. 1.

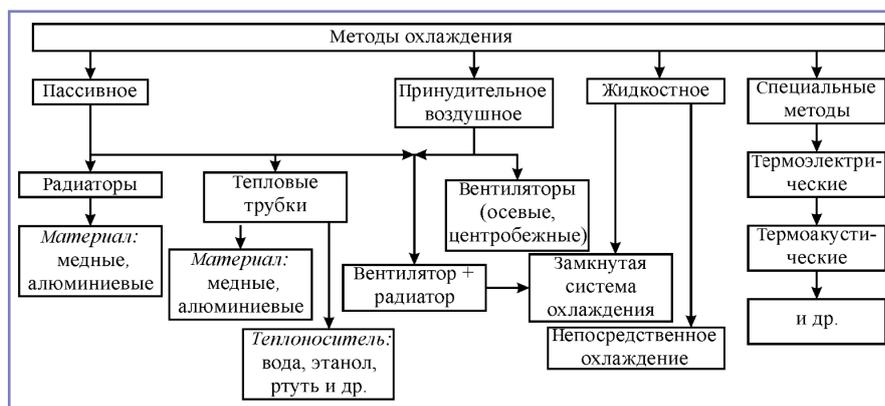


Рис. 1. Классификация методов охлаждения силовых полупроводников

На тяговом подвижном составе и в общепромышленных электроприводах высокой мощности получили наибольшее распространение несколько типов охладителей. Так, испарительное охлаждение с тепловыми трубками позволяет получить результаты по интенсивности теплоотвода, сопоставимые с водяным охлаждением. При этом упрощается конструкция и снижаются затраты на эксплуатацию преобразователей. Сравнение по удельным габаритным показателям демонстрирует, что для мощных полупроводников на токи 500...1000 А требуется объем на один прибор при обычных охладителях примерно 15 дм<sup>3</sup>, а для тепловых труб – 5 дм<sup>3</sup>.

Достоинствами жидкостной системы охлаждения являются ее более высокая эффективность, относительно невысокая энергоемкость, возможность охлаждения герметичных устройств. К недостаткам относятся опасность протечек, присутствие двух движущихся деталей (насос и вентилятор) в составе электронной аппаратуры, резко снижающее ее надежность и повышающее ее шумность. В качестве примера приведем контур водяного охлаждения преобразователя серии MITRAC TC3300. Несколько фланцевых стационарных соединений использованы в местах сопряжения системы трубопроводов с водяным насосом и расширительным баком, а также на выходе из преобразователя для подключения башни охлаждения. Суммарный объем охлаждающей жидкости в преобразователе вместе с типовой башней охлаждения составляет около 100 л. Для работы при отрицательных температурах окружающего воздуха в воду добавляют необходимое количество гликоля.

Термоэлектроохладители, действие которых основано на эффекте Пельтье, обладают следующими достоинствами: продолжительность безотказной работы превышает 200 тысяч часов; разница температур между холодной и горячей сторонами модуля может превышать 60 °С при температуре окружающей среды 25 °С; независимое отношение к положению в пространстве; малые размеры и низкая масса; охладители могут являться также нагревателями и одновременно датчиками температуры; высокая надежность; бесшумность. Их недостатки: необходимы мощный источник питания и охлаждение внешней горячей стороны модуля.

Применение радиаторов с естественным охлаждением является наиболее надежным, дешевым и простым решением. Однако при реализации подобного решения используется громоздкая аппаратура. Сторона, соприкасающаяся с полупроводниковым элементом, должна быть гладкой. Тем не менее неровности и микропустоты все-таки остаются. Если их не ликвидировать, то все они будут заполнены воздухом, который будет препятствовать нормальному теплообмену. Очевидно, что интенсивность теплоотвода возрастает с увеличением объема радиатора. Кроме этого, при выборе радиатора необходимо руководствоваться теми обстоятельствами, что радиатор должен быть доступен в транспортном исполнении, габаритные размеры радиатора должны позволять его размещение в специальном отсеке преобразователя. Система принудительного воздушного охлаждения применяется, например, на тепловозе 2ТЭ25А (подача воздуха для тягового преобразователя обеспечивается вентилятором с двигателем мощностью 22 кВт) и электровозе ВЛ85 (применен двигатель вентилятора мощностью 55 кВт).

Независимо от типа охлаждения все системы принудительного охлаждения должны удовлетворять ряду требований: обеспечение максимальной равномерности подвода охлаждающего вещества к поверхности охлаждения модуля; минимизация затрат мощности на циркуляцию воздуха/жидкости; обеспечение технологичности сборки и обслуживания преобразователя; минимизация затрат, связанных с изготовлением и приобретением комплектующих; обеспечение герметичности жидкостного контура в районе установки силового модуля и другого электрического оборудования преобразователя (для жидкостного охлаждения).

Выбор конкретной системы охлаждения и типа теплоносителя является комплексной основной задачей при синтезе систем автоматического регулирования температуры. Корректно выбранный способ охлаждения позволяет поддерживать температуру полупроводников в пределах максимально допустимого значения. Вместе с этим во время работы неизбежно возникают пульсации температуры, что негативно влияет на надежность силовых ключей, сокращая их срок службы [4, 5]. Очевидно, что для надежной работы

автономного инвертора недостаточно контроля только среднего (или максимального) значения температуры – даже при невысоком значении средней температуры ее колебания могут существенно уменьшить срок наработки до отказа из-за появления усталостных повреждений в связи с постоянными динамическими тепловыми нагрузками. В связи с этим актуальной становится задача ограничения не только значения температуры, но также и ее колебаний. Для уменьшения колебаний температуры необходимо применение быстродействующей системы регулирования, время воздействия которой на температуру сопоставимо с постоянной времени нагрева из-за действия тока. Очевидно, что ни одна из эксплуатируемых в настоящее время на тяговом подвижном составе систем охлаждения не может этого обеспечить.

Для выбора регулирующего воздействия на тепловое состояние полупроводников выполнен анализ потерь, возникающих при работе силовых ключей. Мощность потерь в силовых ключах автономного инвертора напряжения складывается из электрических и коммутационных потерь, оба вида вызывают нагрев полупроводника.

При формировании выходного напряжения алгоритмами широтно-импульсной модуляции электрические потери в транзисторах составляют

$$\Delta P_{эл,VT} = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{np}}{\pi} I_{max} + \frac{R_{диф,д}}{4} I_{max}^2 \right) + \mu \cos \varphi \left( \frac{U_{np}}{8} I_{max} + \frac{R_{диф,д}}{3\pi} I_{max}^2 \right). \quad (1)$$

Электрические потери в диодах:

$$\Delta P_{эл,VD} = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{np,д}}{\pi} I_{max} + \frac{R_{диф,д}}{4} I_{max}^2 \right) - \mu \cos \varphi \left( \frac{U_{np,д}}{8} I_{max} + \frac{R_{диф,д}}{3\pi} I_{max}^2 \right), \quad (2)$$

где  $U_{np}$  и  $U_{np,д}$  – граничное падение напряжения транзистора и диода,  $R_{диф}$  и  $R_{диф,д}$  – дифференциальное сопротивление транзистора и диода при прямом токе,  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности обмотки статора,  $\mu$  – коэффициент пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции.

При допущении о линейной зависимости рассеиваемой энергии от тока коллектора при переключении коммутационные потери в транзисторах

$$\Delta P_{ком,VT} = \frac{f_k}{\pi} (E_{вкл} + E_{выкл}), \quad (3)$$

где  $f_k$  – частота коммутации транзисторов,  $E_{вкл}$  и  $E_{выкл}$  – энергия коммутационных потерь транзистора при

замыкании и размыкании цепи «Коллектор – эмиттер».

Коммутационные потери диодов, обусловленные восстановлением обратного сопротивления,

$$\Delta P_{\text{восст,VD}} = \frac{f_k}{\pi} E_{\text{восст}}(i), \quad (4)$$

где  $E_{\text{восст}}$  – энергия восстановления обратного сопротивления диода.

Из выражений (3), (4) очевидно, что коммутационные потери в основном являются функцией частоты коммутации  $f_k$ , которая является переменным параметром системы управления инвертором. Таким образом, авторами статьи выбрана частота коммутации автономного инвертора напряжения в качестве регулирующего воздействия, обеспечивающего высокодинамичное изменение температуры полупроводниковых приборов.

Для проверки работоспособности предлагаемого решения использовано имитационное моделирование в среде MATLAB.

Математическое описание тепловых процессов в полупроводниковом ключе осуществлено на основе упрощенной эквивалентной тепловой схемы замещения, представляющей собой многозвенную цепь из резисторов и конденсаторов с переходными характеристиками, являющимися диаграммами одиночных импульсов, которые указывают в документации на транзистор и диод как тепловой отклик. Эквивалентная тепловая схема одной стойки автономного инвертора напряжения (рис. 2а), предложенная авторами, показана на рис. 2б [6].

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $Z_{sa}$  – динамическое тепловое сопротивление «Охладитель – охлаждающий воздух»,  $Z_{cs}$  – динамическое тепловое сопротивление «Корпус – охлаждающий воздух»,  $Z_{jc,VT}$ ,  $Z_{jc,VD}$  – динамические тепловые сопротивления «Кристалл – корпус транзистора и диода»,  $\theta_{то}$ ,  $\theta_{кр}$ ,  $\theta_{кр,VT}$ ,  $\theta_{кр,VD}$  – температуры охлаждающего воздуха, корпуса и кристалла транзистора и диода,  $\theta_{в}$  – температура охлаждающего воздуха,  $\Delta P_{VT}$ ,  $\Delta P_{VD}$  – суммарная мощность потерь в транзисторе и диоде. При исследовании установившихся режимов динамическое тепловое сопротивление можно представить следующим образом:

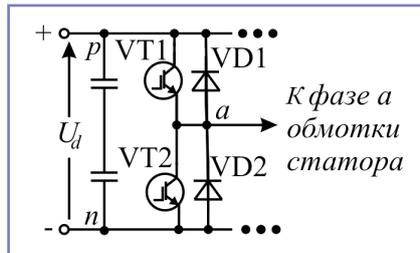
$$Z_{xy}(t) = R_{xy} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{xy}}} \right),$$

где  $R_{xy}$  – тепловое сопротивление между сопряженными узлами  $x$  и  $y$ ,

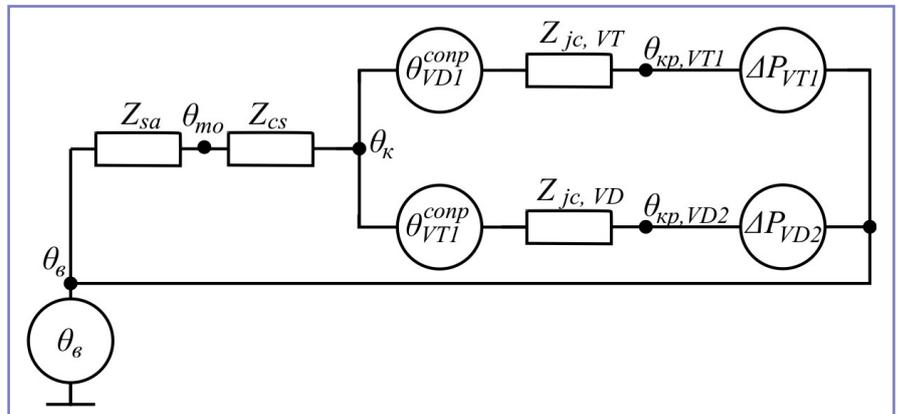
$\tau_{xy}$  – постоянная времени теплового переходного процесса. Связь между сопротивлением и температурой определяется выражением

$$R_{xy} = \frac{\theta_x - \theta_y}{\Delta P}.$$

Как показывают исследования [6], наибольший нагрев во время работы испытывают кристаллы полупроводников. Применительно к схеме (рис. 2а) выражения для определения температур



а)



б)

Рис. 2. Структура одной фазы автономного инвертора напряжения (а) и ее эквивалентная тепловая схема замещения (б)

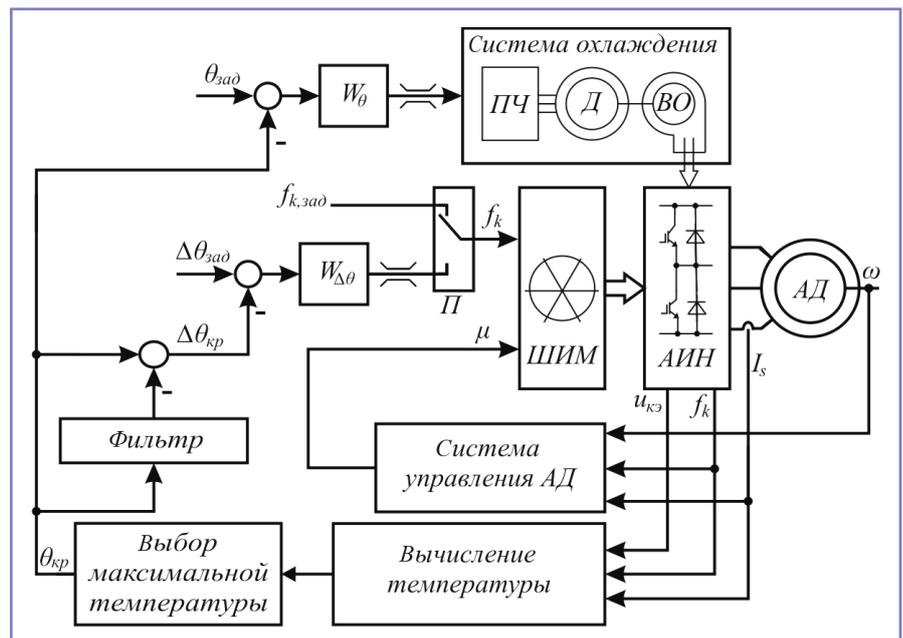


Рис. 3. Структура системы регулирования температуры

$\Pi$  – переключатель режимов работы,  $f_{k, \text{зад}}$  – заданное значение частоты коммутации транзисторов,  $\Delta\theta_{\text{зад}}$  – заданное значение колебания температуры кристалла полупроводника,  $\omega$  – частота вращения вала ротора АД.

Принцип работы системы регулирования температуры состоит в следующем. Если изменения температуры  $\Delta\theta_{\text{кр}}$  не превышают заданного значения  $\Delta\theta_{\text{зад}}$ , то переключатель  $\Pi$  находится в крайнем верхнем положении и АИН работает с постоянной частотой коммутации  $f_k$ , которая определяется значением задания системы управления электропривода  $f_{k, \text{зад}}$ . Тепловое состояние полупроводников определяется токовой нагрузкой и работой вентилятора охлаждения. Если значение  $\Delta\theta_{\text{кр}}$  превышает  $\Delta\theta_{\text{зад}}$ , то переключатель  $\Pi$  находится в крайнем нижнем положении, подключая тем самым контур регулирования температуры, что позволяет с высоким быстродействием изменить коммутационные потери за счет регулирования частоты коммутации и, как следствие, менять температуру полупроводника.

Наиболее точным вариантом контроля температуры является наличие датчика, однако по ряду практических причин установка датчика затруднительна. В этом случае возможно косвенное определение температуры по выражениям (5) и (6).

Для нахождения текущего значения температуры  $\Delta\theta_{\text{кр}}$  выполнена фильтрация сигнала согласно выражению

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{\tau_{\Phi} p + 1},$$

где  $\tau_{\Phi}$  – постоянная времени фильтра.

В качестве регулятора температуры авторами использован ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_{\theta}(p) = k_{\theta} + \frac{1}{\tau_{\theta, \text{и}} p} + \tau_{\theta, \text{д}} p,$$

где  $\tau_{\theta, \text{и}}$  и  $\tau_{\theta, \text{д}}$  – постоянные времени интегрирования и дифференцирования.

ПИД-регулятор позволяет плавно регулировать величину  $f_k$ . Плавное регулирование  $f_k$  может вызвать сложности при технической реализации алгоритмов управления полупроводниковым преобразователем, поэтому при практическом использовании рассматриваемой системы можно рекомендовать применение релейного регулятора температуры вместо ПИД-регулятора.

Ограничение выходных сигналов ПИД-регулятора необходимо осуществить по максимальному и минимальному значениям частоты коммутации.

Максимальное значение  $f_k$  определяется временем включения  $t_{\text{вкл}}$  и выключения  $t_{\text{выкл}}$  силового ключа:

$$f_{k, \text{max}} \leq \frac{1}{\pi(t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}})}$$

Максимальная частота также ограничена максимальным энергопотреблением  $P_{\text{max}}$  за время включенного состояния  $\Delta t$  за период коммутации  $T_k$ :

$$f_{k, \text{max}} \leq \frac{P_{\text{max}}}{E_{\text{вкл}} + E_{\text{выкл}} + I_{\text{кз}}^2 R_{\text{диф}} \Delta t}$$

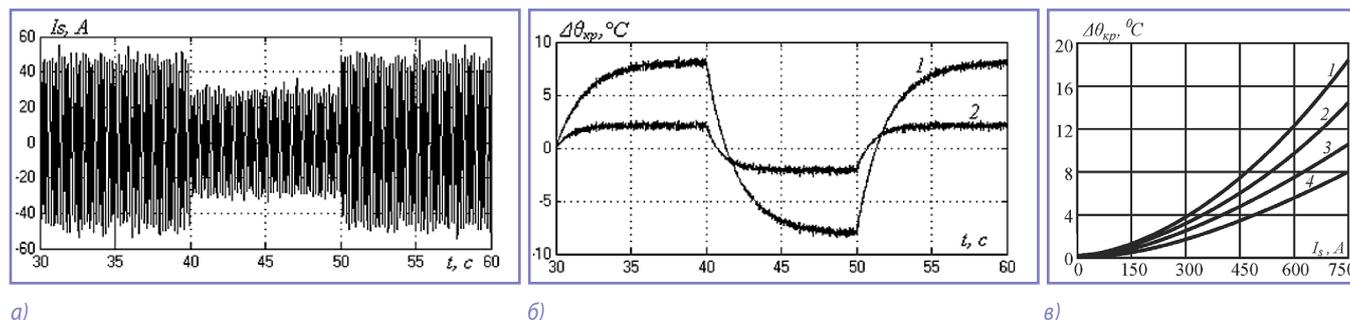
Минимальное значение частоты коммутации определяется гармоническим составом тока статора асинхронного двигателя, который оказывает прямое влияние на нагрев обмоток статора и ротора и значение колебаний момента [7, 8]. Таким образом, если максимальное значение  $f_k$  является функцией состояния полупроводниковых ключей и слабо зависит от вида нагрузки и ее характеристик, то минимальное значение частоты коммутации зависит прежде всего от вида и свойств нагрузки. Для тягового преобразователя частоты минимальное значение частоты коммутации ключей зависит от теплового состояния тягового двигателя и его реализации тяговой задачи.

В результате расчетов и моделирования установлено, что с увеличением

установленной мощности двигателя и полупроводниковых ключей диапазон допустимых частот коммутации смещается в область меньших значений. Так, для двигателя мощностью 14 кВт диапазон допустимых частот составил 5...36 кГц, для двигателя мощностью 360 кВт – 2...12 кГц.

Величина коэффициента модуляции  $\mu$  полностью определяется алгоритмами работы системы управления АД, которая меняет его в зависимости от задания на частоту вращения и электромагнитный момент в текущих условиях разгона / движения с установившейся скоростью / торможения и сцепления колес с рельсами. Изменение  $\mu$  приводит к изменению мощности потерь и, как следствие, температуры полупроводников, в результате чего с точки зрения теории автоматического управления коэффициент модуляции можно классифицировать как возмущающее воздействие на систему регулирования температуры. Принципы работы системы управления АД зависят от ее типа и выбранных настроек. В качестве системы управления может быть выбрана система скалярного управления, векторного управления или прямого управления моментом. Описание работы и расчет основных настроек и регуляторов систем в данной статье не рассматриваются.

Результаты применения системы управления колебаниями температуры, полученные в программном комплексе MATLAB, показаны на рис. 4. Очевидно, что синтезированная система реализует возможности по регулированию частоты коммутации  $f_k$  и, как следствие, температуры полупроводника. Моделирование проведено для электропривода с двигателем мощностью 360 кВт. Результаты моделирования также показали, что изменение  $f_k$  приводит к изменению и средней температуры



а) б) в)  
Рис. 4. Результаты моделирования системы регулирования температуры: осциллограммы тока статора (а) и температуры (б) (1 – без изменения  $f_k$ , 2 – с изменением  $f_k$ ); зависимость колебаний температуры от тока статора (в) (1 –  $f_k = 12$  кГц, 2 –  $f_k = 9$  кГц, 3 –  $f_k = 6$  кГц, 4 –  $f_k = 3$  кГц)

$\theta_{кр}$  – уменьшение  $f_k$  вызывает одновременное уменьшение  $\Delta\theta_{кр}$  и  $\theta_{кр}$ .

Рассмотренный подход к регулированию средней температуры и ее колебаний в полупроводниковых приборах не является основным для применения в тяговых электроприводах. Задача предложенной системы – уменьшение колебаний температуры, в то время как поддержание температуры в рамках предельных значений – это задача системы охлаждения. Целесообразность применения системы регулирования возрастает в том случае, когда работа системы охлаждения полупроводников не связана напрямую с их температурой, то есть при отсутствии обратной связи и регулирования по отклонению контролируемой величины (это приводит к существенной инерционности охлаждения), что имеет место на большей части эксплуатируемого в настоящее время тягового подвижного состава.

### Литература

1. Киселев И.Г. Расчеты нагрева и охлаждения полупроводниковых преобразовательных установок железнодорожного транспорта [Текст] / И.Г. Киселев, А.Б. Буянов. – СПб.: ПГУПС-ЛИИЖТ, 2001. – 80 с.
  2. Power electronics technology at the dawn of the new millenium-status and future / J.D. Van Wyk, F.C. Lee // International Conference on Power Electronics Specialists Conference, 1999.
  3. Определение температуры обмоток тягового асинхронного двигателя введением дополнительных составляющих напряжения / А.С. Космодамианский [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта, № 2–2016. – С. 33–38.
  4. Сравнительная оценка различных способов скалярного управления тяговым асинхронным двигателем с учетом температуры обмоток / А.С. Космодамианский [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, № 6–2011. – С. 129–135.
  5. Оптимизация энергетических характеристик электропривода вспомогательных механизмов тягового подвижного состава / Ю.М. Иньков, А.А. Пугачев // Электроника и электрооборудование транспорта. № 6–2016. – С. 43–47.
  6. Определение установившейся температуры полупроводников автономного инвертора напряжения / А.С. Космодамианский, Н.Н. Стрекалов, А.А. Пугачев // Электроника и электрооборудование транспорта, № 6–2016. – С. 8–12.
  7. Иньков Ю.М. Потери мощности в асинхронных тяговых двигателях перспективного электроподвижного состава / Ю.М. Иньков, Т.Н. Фадейкин, Я.А. Бредихина // Электротехника. № 8–2014. – С. 44–47.
  8. Определение сопротивления и температуры обмотки статора асинхронного двигателя по постоянной составляющей тока / А.С. Космодамианский [и др.] // Наука и техника транспорта. № 3–2016. – С. 31–38.
- Космодамианский Андрей Сергеевич**  
В 1981 году окончил Омский государственный университет путей сообщения. Доктор технических наук, профессор. В 2002 году защитил докторскую диссертацию по теме «Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов». Опыт работы – 35 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения. Имеет свыше 190 научных трудов, более 60 патентов.
- Стрекалов Николай Николаевич**  
Родился в 1979 году. В 2003 году окончил Московский государственный университет путей сообщения по специальности «Локомотивы». Опыт работы – 16 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (МИИТ). Имеет 15 научных трудов, 14 патентов.
- Пугачев Александр Анатольевич**  
В 2006 году окончил Брянский государственный технический университет. Кандидат технических наук, доцент. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Регулируемый электропривод вспомогательных агрегатов подвижного состава с асинхронным двигателем, имеющим поворотный статор». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета. Имеет свыше 80 научных трудов, 20 патентов.
- Kosmodamianskiy Andrey**  
In 1981 he graduated from Omskiy State Railroads University. A Doctor of Engineering Science, professor. In 2002 he defended a doctorate thesis on the subject «Theoretical foundations and development of temperature regulation systems of traction electrical machines of locomotives». Work experience – 35 years. At present he works as head of the department «Traction rolling equipment» at Russian University of Transport. He has more than 190 scientific works, more than 60 patents.
- Strekalov Nikolay**  
Was born in 1979. In 2003 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering majoring in «Locomotives». He has 16 years of work experience. At present he works as Head teacher of «Traction equipment» department at Russian University of Transport. He has 15 scientific papers, 14 patents.
- Pugachev Alexander**  
In 2006 he graduated from Bryanskiy State Technical University. He is a candidate of Engineering Science, associated professor. In 2009 he defended a thesis on the subject «Regulated electric motor drive of auxiliary units of rolling equipment with induction motor with rotating stator». Work experience – 11 years. At present he works as associated professor at the department «Electronic, radioelectronic and electro-technical systems» in Bryanskiy State Technical University. He has more than 80 scientific works, 20 patents.

# Разработка сглаживающего реактора фильтр-устройства тяговой подстанции постоянного тока с замкнутым магнитным потоком

// Development of a filter reactor with a closed magnetic flux for DC traction substation //

Бадёр М.П., д.т.н., профессор,  
Дожина Г.В.,  
РУТ (МИИТ), Москва

Лобынцев В.В., к.т.н.,  
Дураков Д.Н., Динисиллов А.С.,  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Бурсук В.И., к.т.н.,  
Главное командование ВМФ, Санкт-Петербург

*В настоящее время на тяговых подстанциях сети электрифицированных железных дорог постоянного тока используются надежные, но при этом морально устаревшие сглаживающие реакторы типа РБФА-У. Указанные реакторы имеют открытое исполнение и характеризуются значительным уровнем потерь, достигающим нескольких сотен киловатт. Использование новых конструктивных решений, а также современных методов расчета позволяет разработать конструкцию сглаживающего реактора фильтр-устройства с полностью замкнутым магнитным потоком в бронестержневой радиально-цилиндрической магнитной системе. В статье представлены предлагаемые конструктивные решения, использованные при разработке энергоэффективного сглаживающего реактора с ранее недостижимыми рабочими характеристиками при двукратном или трехкратном увеличении плотности энергии в единице объема.*  
**Ключевые слова:** сглаживающий реактор, тяговая подстанция.

Выпрямленное напряжение тяговых подстанций содержит переменную составляющую, состоящую из гармоник, имеющих разные частоту и величину напряжения. Гармоники напряжения вызывают появление в тяговой сети идентичных по частоте гармоник тока, оказывающих опасное и мешающее влияние на проводные линии связи и устройства систем централизованной блокировки (СЦБ). Снижение влияния тяговых сетей на работу линий связи и устройств СЦБ

*At present, railroads traction substations use reliable, yet obsolete filter reactors of the RBFA-U type. These reactors have an open design and are characterized by a significant level of losses reaching several hundred kilowatts. New design solutions, as well as modern calculation methods, allow to design a filter reactor with a completely closed magnetic flux in an armored rod cylindrical magnetic system. The paper discusses the proposed design solutions used in the development of an energy-efficient smoothing reactor with previously unattainable performance characteristics with a 2–3 times increase in the energy density per volume.*

**Keywords:** filter reactor, electrical substation.

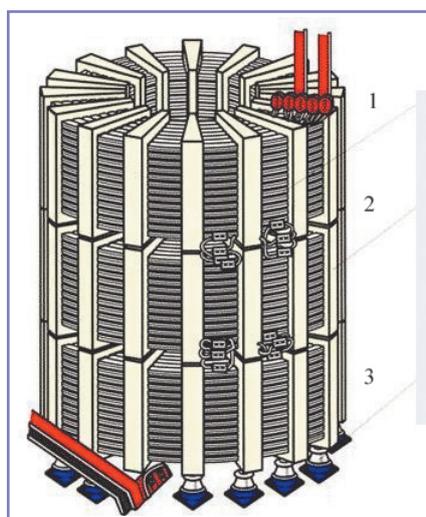


Рис. 1. Трехблочный реактор ФУ:  
1 – провода, 2 – бетонные колонки,  
3 – изоляторы

до установленных норм обеспечивают сглаживающие фильтр-устройства (ФУ), устанавливаемые на выходе тяговых подстанций постоянного тока [1–2].

В ФУ тяговых подстанций применяются реакторы типа РБФА-У-6500/3250 (рис. 1), рассчитанные на номинальное напряжение 3,3 кВ с длительно допустимым током 6500 А. Конструктивно реактор ФУ может состоять из нескольких соосно расположенных блоков, установленных на опорные изоляторы. Каждый отдельный блок представляет собой катушку из голого алюминиевого провода 1, вмонтированного в бетонные колонки 2. Бетонные колонки обеспечивают надежную фиксацию витков и локально выступают в качестве твердой межвитковой изоляции. Открытая часть обмоток реактора охлаждается атмосферным воздухом. Использование голого алюминиевого провода в комбинации с бетонными поддерживающими колонками обеспечивает высокую стойкость блоков реактора к нагреву, так как мощность джоулевых потерь в обмотках может достигать сотен киловатт.

Индуктивность каждого блока и реактора в целом зависит исключительно от его геометрических размеров, поэтому единственным способом достижения заданных параметров индуктивности является наращивание числа ампер-витков за счет увеличения количества блоков и геометрических размеров всей системы. Открытое конструктивное исполнение обмоток реакторов типа РБФА-У не позволяет обеспечить экранирование рассеянного магнитного поля, в связи с чем их обычно располагают в отдельных помещениях вдали от чувствительной электроаппаратуры [3–4].

Замена реакторов типа РБФА-У на броневой могла бы устранить все перечисленные выше недостатки. Однако материалы с нелинейными магнитными характеристиками не принято использовать в таких устройствах по причине

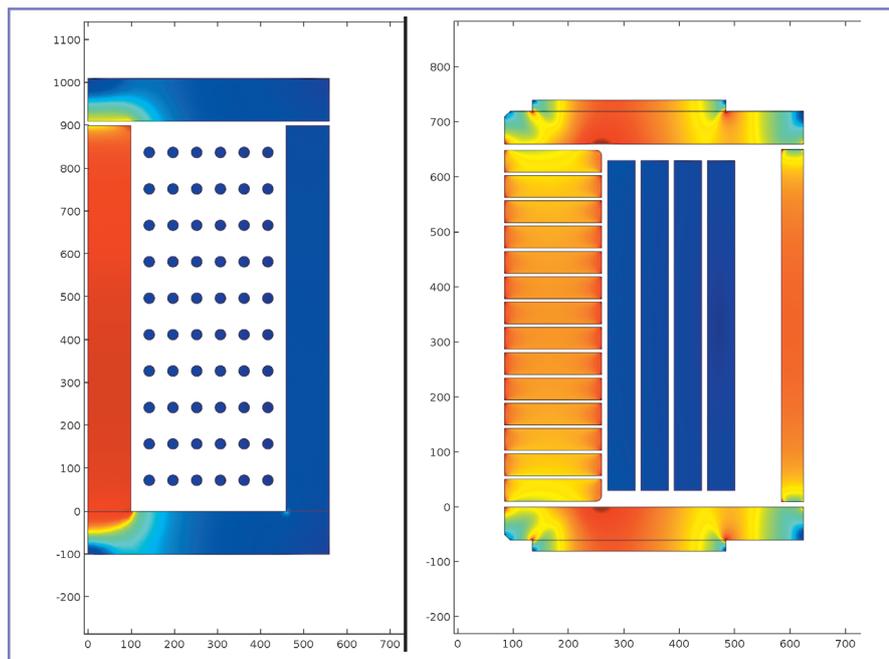


Рис. 2. Один из начальных (слева) и окончательный (справа) варианты конструкции

зависимости параметров их индуктивности от амплитуды рабочего тока.

В данной статье рассматривается конструкция бронестержневого реактора, в которой применяются технические решения, позволяющие линеаризовать параметры его индуктивности в широком диапазоне рабочих токов и предотвратить преждевременный переход магнитной системы в насыщение, что при прочих равных условиях дает возможность сократить габаритные размеры и повысить энергоэффективность устройства в целом.

Взамен РБФА-У предлагается использовать реактор бронестержневого типа с замкнутой радиально-цилиндрической магнитной системой. Основной конструктивной особенностью предлагаемого реактора является наличие немагнитных зазоров, обеспечивающих линеаризацию параметров магнитной системы в заданном диапазоне рабочих токов.

На рис. 2 представлено сравнение окончательной конструкции с одним из ее более ранних вариантов. Обе конструкции изображены в виде осевых разрезов. Ввиду симметричности левые половины не отображены.

В качестве начального приближения, для оценки влияния зазоров на параметры системы, произведен расчет конструкции обычного бронестержневого реактора при разных величинах зазора между стержнем и ярмовым фланцем. В ходе моделирования выявлено, что сердечник за счет своей относительно

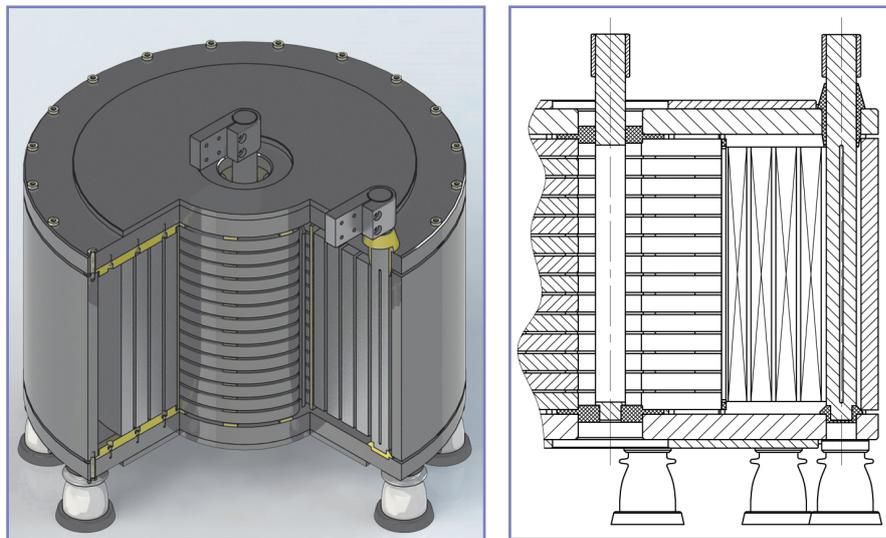
малой площади имеет самую большую плотность магнитного потока и раньше других элементов магнитной системы выходит в насыщение. Расчет также показал, что несколько небольших зазоров, при тех же равных, обеспечивают меньший спад индуктивности системы по сравнению с меньшим числом зазоров большего размера.

Другими слабыми местами конструкции, выходящими в насыщение, являлись участок ярмового фланца непосредственно над внешним радиусом стержня и внешняя обечайка. Проблема устранена добавлением на ярмовой фланец усиливающего кольца

и созданием зазоров между ярмовым фланцем и обечайкой.

В процессе расчетов выявлено, что внутренняя часть сердечника обеспечивает незначительный вклад в общую индуктивность системы ввиду малого объема материала. В связи с этим было принято решение сделать сердечник полым. Необходимая площадь сечения материала подбиралась за счет варьирования внутреннего и внешнего диаметров сердечника. Отверстие в центре магнитной системы в совокупности с зазорами в сердечнике также выступает в роли охлаждающего канала.

Конечный вариант конструкции представлен на рис. 3. Линеаризация магнитного потока достигается за счет 15 немагнитных зазоров в центральной части магнитопровода и стержне, а также двух немагнитных зазоров между ярмовыми фланцами радиально-цилиндрической магнитной системы и наружной обечайкой. Обмотка из 32 витков (4 секции по 8 витков) имеет интегральное сечение  $2940 \text{ мм}^2$ , набранное параллельным соединением 42 изолированных алюминиевых проводников. Конструктивное исполнение проводника представляет собой лицендрат, что позволяет значительно снизить индуктивное сопротивление проводника, за счет чего уменьшаются потери на вихревые токи по сравнению с листовой конструкцией. Длина проводника указанного выше сечения в обмотке составляет 79 м. Между секциями устанавливаются диэлектрические дистанеры, одновременно формирующие охлаждающие



а) б)  
Рис. 3. Трехмерная модель реактора типа РЖФА-6500 с секторным вырезом (а) и его плоский разрез (б)

каналы для естественной циркуляции атмосферного воздуха. Сама обмотка располагается на диэлектрическом основании в немагнитном окне магнитопровода.

Ввод и вывод электрического тока в обмотке реактора осуществляются по двум токовым вводам – внешнему и внутреннему, рассчитанным на присоединение штатных токоведущих частей посредством использования переходных контактов цангового типа. Внутренний токоввод размещается внутри полого сердечника магнитопровода. Размеры всех зазоров подобраны таким образом, чтобы предотвращать преждевременный переход материала магнитопровода в насыщение в широком диапазоне рабочих токов. При этом их относительно небольшая величина обеспечивает минимизацию роста напряженности магнитного поля в немагнитной среде и отвлечение магнитного потока за пределы магнитопровода.

Все расчеты производились при помощи метода конечных элементов на основе приведенных ниже уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t},$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t},$$

$$\nabla \cdot D = \rho,$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля,  $j$  – плотность электрического тока,  $D$  – электрическая индукция,  $E$  – напряженность электрического поля,  $B$  – магнитная индукция,  $\rho$  – объемная плотность стороннего электрического заряда.

В качестве материала сердечника выбрана сталь 3 с известными параметрами кривой намагничивания [5].

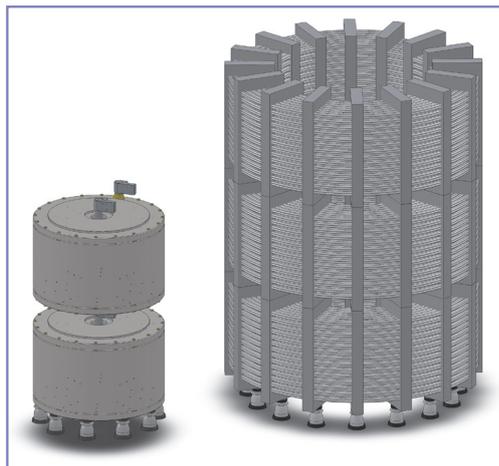


Рис. 4. Сравнение габаритных размеров реакторов РЖФА-6500 (слева) и РБФА-У-3250/6500 (справа)

Габариты реакторов РБФА-У-3250/6500 и РЖФА-6500 с номинальным значением индуктивности 5 мГн и соосным размещением блоков представлены на рис. 4, а их параметры приведены в таблице 1.

Омическое сопротивление трехблочного реактора РБФА-У при индуктивности 5 мГн составляет 6 Ом, при этом предлагаемая конструкция РЖФА за счет использования магнитопровода позволяет

уменьшить количество необходимых витков в одном блоке до 32, что соответствует омическому сопротивлению 0,75 Ом на одну секцию при индуктивности 2,5 мГн. Следовательно, двухсекционный РЖФА имеет омическое сопротивление 1,5 Ом при индуктивности 5 мГн, что в четыре раза меньше, чем у его прямого аналога.

Одними из причин размещения реакторов РБФА-У в отдельных помещениях или отдельно стоящих строениях, помимо их габаритных размеров, являются высокие значения полей рассеяния и их электромагнитное влияние на слаботочную технику.

На рис. 5 представлено сравнение рассеянных магнитных полей для обеих конструкций реакторов при токе 7728 А (значение максимально ограниченного тока короткого замыкания (КЗ) при штатном отключении фидерного выключателя, зарегистрированного при проведении измерений на тяговой подстанции «Перерва» МЖД). Принято считать, что предельное значение магнитного поля, не оказывающее влияния на

Таблица 1. Сравнение параметров фильтр-устройств

Параметр	РБФА-У	РЖФА (две секции)
Номинальный ток, А	6500	6500
Индуктивность, мГн	5	5,4-4,5
Тип провода	А-240	АПСД 5x14
Длина единичного провода в обмотке, м	8400	6720
Масса обмотки, кг	5500	1300
Сопротивление обмотки, мОм	6	1,5
Потери при рабочем токе, кВт	253,5 (при 20 °С)	63,4 (при 20 °С)
Масса остальных элементов, кг	4300	5900
Габаритные размеры, мм <sup>3</sup>	2500x2500x3150	1250x1250x2000

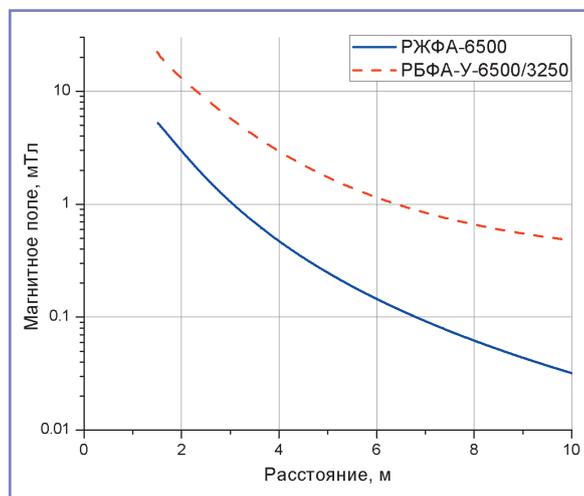


Рис. 5. Сравнение рассеянных полей

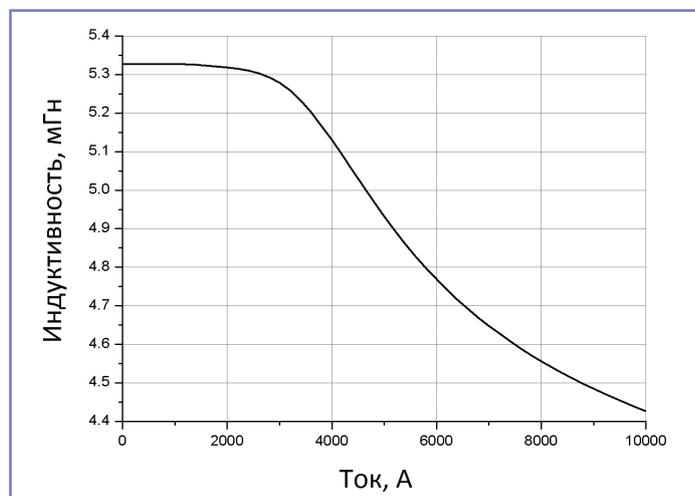


Рис. 6. Индуктивность двух секций типа РЖФА-6500 в зависимости от тока

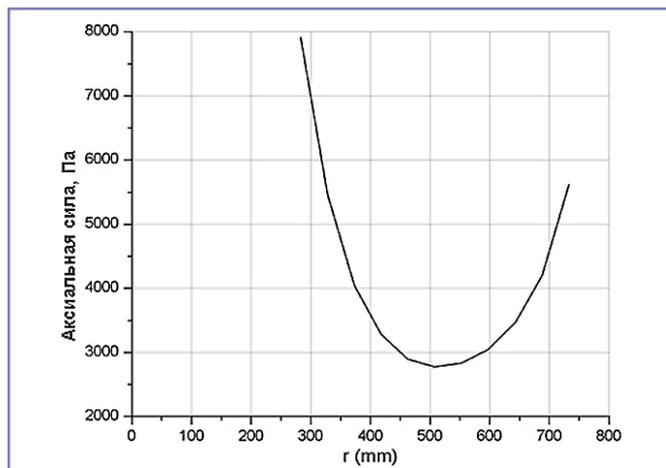


Рис. 7. Осевые силы в зависимости от радиуса при токе 7728 А

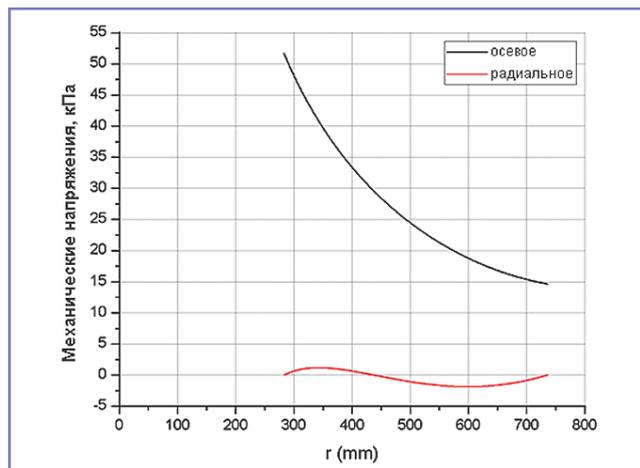


Рис. 8. Осевые и радиальные нагрузки в середине обмотки при 7728 А

работу слаботочных устройств и не приводящее к ухудшению самочувствия обслуживающего и дежурного персонала, составляет порядка 0,05 мТл [2]. В этой связи при проектировании электроустановок, одновременно являющихся источниками электромагнитного излучения, вычисляется, на каком удалении от них магнитное поле спадает до предельно допустимого. Согласно рис. 5, конструктивные особенности магнитной системы РЖФА позволяют сократить величину рассеянных магнитных полей практически на порядок.

Для проверки линейности системы произведен расчет индуктивности РЖФА в зависимости от тока. Соответствующий график для двух секций реактора предлагаемой конструкции представлен на рис. 6. Как видно из информации, представленной на графике, добавление немагнитных зазоров обеспечивает требуемую величину индуктивности во всем диапазоне рабочих токов.

Немаловажным конструктивным параметром, определяющим эксплуатационную надежность разрабатываемого устройства, является механическое напряжение внутри обмотки при коротких замыканиях (КЗ), возникающих в тяговой сети. Расчеты выполнены в приближении однородной среды с использованием известных дифференциальных уравнений [6]:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left\{ r \cdot \frac{du(r)}{dr} \right\} - \frac{u(r)}{r^2} = - \frac{(1-v^2)}{Y} \cdot J \cdot B(r),$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{Y}{1-v^2} \cdot \left\{ \frac{u(r)}{r} + v \cdot \frac{du(r)}{dr} \right\},$$

$$\sigma_r = \frac{Y}{1-v^2} \cdot \left\{ \frac{du(r)}{dr} + v \cdot \frac{u(r)}{r} \right\},$$

где  $r$  – текущий радиус, м;  $u(r)$  – локальное смещение в радиальном направлении, м;  $v$  – безразмерный коэффициент Пуассона;  $Y$  – модуль Юнга, Па;  $J$  – плотность тока в обмотке, А/м<sup>2</sup>;  $B(r)$  – магнитное поле на радиусе  $r$ , Тл;  $\sigma_{\theta}$  – тангенциальные напряжения, Па;  $\sigma_r$  – радиальные напряжения, Па.

Полученные в ходе расчетов значения представлены на рис. 7 в виде графика.

Как видно из информации, представленной на рис. 7, при токах КЗ наибольшие нагрузки приходятся на участки обмотки, наиболее близко расположенные к центральной части (стержню) магнитной системы.

Максимальная растягивающая нагрузка на витки в середине обмотки при КЗ (рис. 8) составит 50 кПа, в то время как предел текучести алюминия марки АД0, из которого изготовлен проводник, составляет порядка 30 МПа.

Помимо динамического действия токов КЗ, произведена оценка тепловых режимов работы реактора типа РЖФА-6500, в котором немагнитные зазоры, расположенные в центральной и периферийной частях между ярмовыми фланцами и другими элементами магнитной системы, выполняют функцию каналов конвективного охлаждения.

Удельное сопротивление  $\rho$  алюминия марки АД0 составляет 0,028 Ом\*мм<sup>2</sup>/м. При длине  $l = 79$  м и сечении  $S$  в 2940 мм<sup>2</sup> его сопротивление, определяемое по формуле

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

составит 0,752 мОм.

При установившемся токе глухого КЗ, равном 50 кА, за время  $t = 150$  мс тепловыделения в обмотке составят

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = 0,282 \text{ МДж.}$$

Масса обмотки вместе с токовводами в одном блоке РЖФА-6500 составляет 780 кг. Учитывая известную теплоемкость алюминия марки АД0  $c = 0,903$  кДж/(кг\*К), это приведет к разогреву на

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m} = 0,4 \text{ град.}$$

В расчетах примем среднее значение коэффициента теплопередачи воздуха  $h = 5$  Вт/м<sup>2</sup>\*К. Общая площадь боковой поверхности обмотки, с которой осуществляется теплосъем в окружающую среду при наличии четырех секций, разделенных дистанерами, составляет  $S_{\text{бок}} = 12,5$  м<sup>2</sup>.

При длительном протекании среднеэффективного тока тяговой подстанции на уровне  $I = 2,8$  кА в обмотке одного блока РЖФА-6500 будет выделяться мгновенная мощность  $P = R \cdot I^2 = 5,9$  кВт.

При конвективном теплосъеме рассчитанная выше мгновенная мощность тепловыделений нагреет обмотку на  $\Delta T = P / (S_{\text{бок}} \cdot h) = 94,3$  град. Расчет тепловых полей реактора РЖФА-6500 при длительном протекании по его обмотке тока 2,8 кА приведен на рис. 9.

Как видно из информации, представленной на рис. 9, наиболее нагретой является первая секция обмотки, наиболее близко расположенная к стержню. Это сопряжено с затрудненным теплосъемом с ее внутренней поверхности. Вместе с тем нагрев обмотки в процессе эксплуатации до температур 120–150 °С допустим при использовании проводов с изоляцией класса С (более 180 °С). В реакторе типа РЖФА-У-6500/3250 часть энергии дополнительно может рассеиваться излучением, но при полностью замкнутом кожухе это сильно

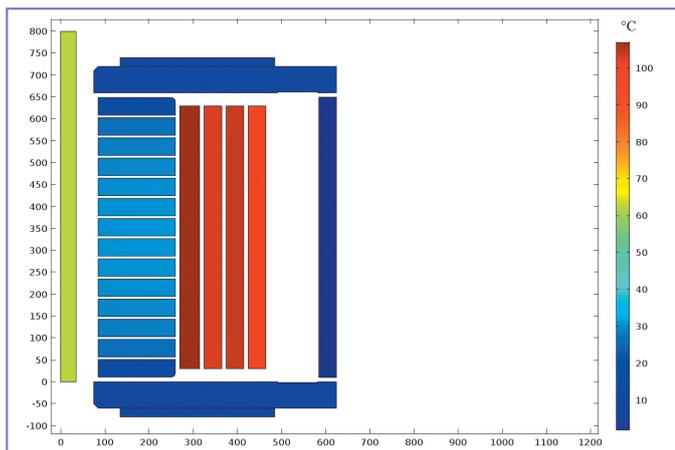


Рис. 9. Карта тепловых полей реактора РЖФА-6500 при токе 2,8 кА

затруднено. По этой причине, с целью увеличения теплоотдачи излучением, боковую поверхность РЖФА следует окрасить черной термостойкой краской.

### Выводы

Представлена конструкция нового энергоэффективного сглаживающего реактора фильтр-устройства. В основу конструкции заложена радиально-цилиндрическая бронестержневая магнитная система с линейризованным магнитным потоком. Основной отличительной особенностью конструкции является наличие немагнитных зазоров в магнитоприводе. Данная конструкция обладает меньшими резистивными потерями и позволяет заметно сократить габаритные размеры при эффективном экранировании рассеянных магнитных полей. Все эти преимущества позволяют рассматривать вариант размещения сглаживающего реактора фильтр-устройства в габарите типовой ячейки тяговой подстанции постоянного тока.

В целом разработанное устройство является перспективным для внедрения на модернизируемых участках сети железных дорог постоянного тока и на объектах морского базирования при увеличении энергоемкости аварийных источников питания постоянного тока в качестве токоограничивающего устройства в обеспечение коммутационной способности штатной коммутационной аппаратуры.

### Литература

- Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н. Тяговые подстанции. – М.: Транспорт, 1986. – 319 с.
- Давыдова И.К., Попов Б.И., Эрлих М.В. Справочник по эксплуатации тяговых подстанций и постов секционирования. – М.: Транспорт, 1974.
- Федоров А.А., Попов Ю.П. Эксплуатация электрооборудования промышленных пред-

приятий. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 280 с.

- Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). – М.: Транспорт, 2002. – 184 с.
- Синхронные двигатели: справочник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей / Н.Н. Новиков, И.Е. Родионов, В.Ф. Шутько. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 36 с.

6. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. – М.: Мир, 1985. – 405 с.

### Бадёр Михаил Петрович

Родился в 1947 году. В 1975 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог». Доктор технических наук, профессор. В 1999 году защитил докторскую диссертацию на тему «Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями». В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ). Имеет более 300 научных трудов и патентов.

### Дожина Галина Владимировна

Родилась в 1974 году. В 1996 году окончила Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Опыт работы – 18 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электроэнергетика транспорта» Российского университета транспорта (МИИТ). Имеет 5 научных публикаций.

### Лобынцев Владимир Васильевич

Родился в 1980 году. В 2003 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Сверхпроводниковые ограничители токов короткого замыкания для систем тягового электроснабжения». Опыт работы – более 20 лет. В настоящее время работает начальником лаборатории в НИЦ «Курчатовский институт». Имеет около 40 научных публикаций, 2 патента на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

### Дураков Дмитрий Николаевич

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Опыт работы – 6 лет. В настоящее время работает инженером-исследователем в НИЦ «Курчатовский институт». Имеет 2 научные публикации.

### Динисилов Андрей Сергеевич

Родился в 1988 году. В 2011 году окончил Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ) по специальности «Компьютерное моделирование физики наноструктур и сверх-

проводников». Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает инженером-исследователем в НИЦ «Курчатовский институт». Имеет 5 научных публикаций.

### Бурсук Виктор Иосифович

Родился в 1958 году. В 1980 году окончил Высшее военно-морское инженерное училище по специальности «Атомные энергетические установки». Кандидат технических наук. В настоящее время Заместитель Главнокомандующего ВМФ России, вице-адмирал. Лауреат Государственной премии Российской Федерации, награжден орденом «За военные заслуги», медалью «200 лет Министерству обороны». Имеет 11 научных публикаций.

### Bader Mikhail

Was born in 1947. He has graduated from the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a specialization in «Power supply of the electrified railways» in 1975, Ph. D. in Technical Sciences, professor. He has defended a Ph. D. thesis on a topic «Electromagnetic compatibility in traction power supply system with feeders, railway automatic equipment and supply lines» in 1999. At present he works as head of department «Transport Electric Supply» of Russian University of Transport. He has more than 300 treatises and patents.

### Dozhina Galina

She was born in 1974. In 1996 she graduated from the Moscow State University of Railway Transport (MIIT) majoring in Electric Power Supply of Electric Railways. She has 18 years of work experience. At present she works as a senior lector of «Electric power engineering of transport» department of the Russian University of Transport (MIIT). She has 5 scientific publications.

### Lobyntsev Vladimir

He was born in 1980. In 2003 he graduated from the Moscow State University of Transport (MIIT) majoring in Electrical Power Supply of Electric Railways. He is Candidate of Technical Sciences. In 2009 he defended his thesis on «Superconductive fault current limiters for traction energy systems». He has more than 20 years of work experience. At present he works as a laboratory chief at the National Research Center «Kurchatov Institute». He has about 40 scientific publications, 2 patents for invention, 1 certificate of registration for software application.

### Durakov Dmitry

He was born in 1989. In 2012 he graduated from the Moscow State University of Transport (MIIT) majoring in Electrical Power Supply of Electric Railways. He has 6 years of work experience. At present he works as an research engineer at the National Research Center «Kurchatov Institute». He has 2 scientific publications.

### Dinisilov Andrey

He was born in 1988. In 2011 he graduated from the National Research Nuclear University (MEPhI) majoring in Computer Simulation of the Physics of Nanostructures and Superconductors. He has 4 years of work experience. At present he works as an research engineer at the National Research Center «Kurchatov Institute». He has 5 scientific publications.

### Bursuk Victor

He was born in 1958. In 1980 he graduated from the Higher Naval Engineering School majoring in Nuclear Power Plants. He is Candidate of Technical Sciences. At present he is Deputy Commander-in-Chief of the Russian Navy, Vice Admiral. He is Laureate of the State Prize of the Russian Federation, awarded the Order «For Military Merit», a medal «200 years of the Ministry of Defense». He has 11 scientific publications.

# Электрооборудование для высокоскоростных электропоездов перспективной системы электрической тяги

// Electrical equipment for high-speed trains of prospective electric traction system //

**Иньков Ю.М., д.т. н., профессор,  
РУТ (МИИТ), Москва**

**Глызин И.И.,  
ОАО «Коломенский завод», г. Коломна**

В статье рассмотрены методы внедрения перспективной системы электрической тяги магистральных железных дорог в России. Для обеспечения бесперебойного и эффективного движения тяжеловесных грузовых и скоростных пассажирских поездов наиболее перспективной является система электрической тяги постоянного тока с напряжением в контактной сети 18–24 кВ. Задача создания контактной сети постоянного тока с повышенным напряжением и повышенной мощностью с существующей базой оборудования силовой электроники может быть решена просто. Создание энергоэффективных статических преобразователей электроэнергии для перспективного электрического подвижного состава на базе гибридных систем IGBT-модулей требует решения многочисленных теоретических и практических задач. Поскольку напряжение асинхронного тягового двигателя не может превышать 3,0 кВ, в статическом преобразователе должен быть установлен соответствующий трансформатор с повышенной частотой переменного напряжения.

В статье рассматриваются возможные варианты реализации трансформаторов на высокую частоту переменного напряжения с сердечниками из пермаллоя, феррита и аморфной стали, а также показано, что использование магнитопровода из аморфной стали позволяет при величине переменного напряжения 11,0–11,5 кВ значительно сократить потери, связанные с гистерезисом и вихревыми токами в магнитном сердечнике трансформатора на частоте напряжения 1,0–1,5 кГц. Приведен пример использования такого трансформатора при питании от однофазного автономного инвертора напряжения.

**Ключевые слова:** система электрической тяги, феррит, пермаллой, аморфная сталь, магнитная система трансформатора, система тягового энергоснабжения, автономный инвертор напряжения, электропоезд, асинхронный тяговый двигатель, IGBT-модуль, пульсации магнитного потока.

*The article considers the methods of implementation of the perspective electric traction system of trunk railways in Russia. To ensure smooth and efficient movement of heavy freight and high speed passenger trains the most promising is the system of the electric DC traction with the voltage in the catenary system 18–24 kV. The task of creating a high voltage traction power system with the DC catenary system with the existing equipment base of power electronics can be solved simply. Whereas the creation of energy efficient static converters of electric power for prospective electric rolling stock on the basis of hybrid systems IGBT-modules requires the solution of numerous theoretical and practical problems. Since the voltage of the asynchronous traction motor can't be higher than 3.0 kV, a matching transformer with a high frequency voltage must be installed in a static converter. The article considers performed at a high frequency voltage variations of realization of transformers with cores made out of permalloy, ferrite and amorphous steel, and it is shown that the use of a magnetic core out of amorphous steel will allow the frequency to voltage of 11,0–11,5 kV significantly to reduce the losses due to hysteresis and eddy currents in the magnetic core of the transformer at the frequency of voltage of 1,0–1,5 kHz. It is given an example of use of such a transformer when powered from single-phase autonomous voltage inverter.*

**Keywords:** system of electric traction, ferrite, permalloy, amorphous steel, the magnetic circuit of the transformer, traction power supply, autonomous voltage inverter, the electric train, asynchronous traction motor, IGBT-module, pulsation of the magnetic flux.

В настоящее время на железных дорогах РФ используют систему электрической тяги постоянного тока с напряжением в контактной сети, равным 3000 В, и переменного тока с напряжением в контактной сети, равным 25 000 В. В соответствии со стратегией научно-технического развития ОАО «РЖД» на период до 2020 года для увеличения объема перевозок средний вес грузового поезда должен составлять 8,3 тыс. т, а также должно быть организовано высокоскоростное движение на направлении Москва – Санкт-Петербург и локализовано производство нового высокоскоростного подвижного состава.

Для реализации эффективного движения грузовых поездов повышенной массы и высокоскоростных пассажирских поездов необходимо увеличение мощности тягового подвижного состава и, как следствие, увеличение мощности системы электроснабжения железных дорог [4].

Существуют несколько способов повышения энергетической эффективности системы электрической тяги постоянного тока. Первый способ – увеличение токов системы тягового электроснабжения 3 кВ с помощью фидера постоянного тока. Второй способ – повышение напряжения в контактной сети постоянного тока. Третий – уменьшение потерь при передаче электрической энергии по проводам системы тягового энергоснабжения.

Для усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока с использованием первого способа с целью увеличения тока в ней возможно модернизировать существующую контактную сеть путем прокладки дополнительных контактных проводов для увеличения общего сечения контактной сети, а также за счет установки дополнительных промежуточных тяговых подстанций. Этот вариант применен для организации высокоскоростного движения поездов на направлении Москва – Санкт-Петербург,

когда к имеющимся 35 тяговым подстанциям дополнительно построили еще 14, доведя среднее расстояние между подстанциями до 12,93 км.

С учетом системы преобразования и передачи электрической энергии от первичной электрической станции до тяговой подстанции, а затем ее передачи в контактную сеть наименее затратным является повышение постоянного напряжения в контактной сети [1].

В 1966 году в качестве эксперимента было принято решение о повышении напряжения на тяговых подстанциях с его автоматическим регулированием в диапазоне от 3500 до 3800 В без строительства дополнительных тяговых подстанций. Таким образом, при повышении напряжения в контактной сети на 20% сила тока в проводах контактной сети уменьшается на 15–18%, что обуславливает уменьшение потерь энергии в контактной сети.

При высокоскоростном движении пассажирских поездов и грузовых поездов повышенной массы значительно повышаются нагрузки на провода контактной сети, поэтому существует необходимость повышения напряжения в контактной сети.

В связи с развитием силовой электроники значительно упрощается задача создания тяговых подстанций при повышении уровня напряжения в тяговой сети системы постоянного тока до 12, 18, 24 кВ [1].

При увеличении мощности передаваемой электрической энергии пропорционально увеличиваются потери энергии в элементах системы тягового электроснабжения и силовой цепи электрического подвижного состава (ЭПС). Возможности уменьшения потерь энергии в тяговых двигателях как постоянно, так и переменного токов в настоящее время практически исчерпаны.

Созданные рядом зарубежных фирм и поступившие в серийное производство биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT-транзисторы) и гибридные модули на их основе рассчитаны на предельные токи до 1,5 кА и напряжение до 6,5 кВ. Это не позволяет создавать энергоэффективные маловольтные преобразователи электроэнергии для перспективного ЭПС, который будет оборудован тяговыми двигателями трехфазного переменного тока. Поэтому такие преобразователи будут многозвенными, а для согласования величин

напряжения в контактной сети 12...24 кВ и напряжения, прикладываемого к обмоткам ТЭД, между вентильными звеньями преобразовательной структуры необходимо устанавливать согласующий трансформатор значительной мощности.

Например, если на моторном вагоне перспективного электропоезда будет установлено четыре тяговых двигателя мощностью по 500 кВт каждый, то с учетом мощности вспомогательных цепей вагона мощность такого трансформатора будет находиться на уровне 2,1...2,3 МВт.

Если на электровазе тяговый трансформатор может быть расположен в высоковольтной камере, то на электропоезде его размещение достаточно проблематично.

Поэтому особенно актуальной становится проблема создания силового трансформатора с высоким КПД, имеющего минимальные массогабаритные показатели.

Одним из путей уменьшения массогабаритных показателей трансформаторов является увеличение частоты их напряжения.

Динамические характеристики современных силовых полупроводниковых приборов позволяют создавать на их основе автономные инверторы, частота выходного напряжения которых (частота напряжения, прикладываемого к первичной обмотке согласующего трансформатора) может составлять 1...3 кГц.

При этом магнитопроводы таких трансформаторов должны быть выполнены из сверхтонкой электротехнической стали, феррита или пермаллоя.

В Российской Федерации имеется опыт создания относительно мощных трансформаторов с магнитопроводами из электротехнической стали, работающих на повышенной (до 400 Гц) частоте прикладываемого к ним напряжения. Для работы на частоте напряжения 1 кГц и выше электротехнические стали применять нецелесообразно из-за больших потерь на гистерезис и вихревые токи и относительно небольшого электрического сопротивления. Лучшими электромагнитными характеристиками обладают ферриты и пермаллои.

Ферритами в общем случае называют двойные окислы, а также более сложные оксидные соединения, содержащие окись трехвалентного железа  $Fe_2O_3$ . В зависимости от сферы применения различают ферриты термостабильные, высокопроницаемые, общего назначения

и другие. Основной особенностью ферритов является высокое удельное сопротивление, достигающее от 10 до  $10^8$  Ом·м.

Пермаллои представляют собой сплавы железа Fe с никелем Ni или железа с никелем и кобальтом Co, обычно легированные молибденом Mo, хромом Cr и другими элементами.

Основные преимущества пермаллоев – высокие значения магнитной проницаемости в слабых полях и малое значение коэрцитивной силы. Недостатками пермаллоев являются большая чувствительность магнитных свойств к механическим напряжениям, пониженные значения индукции насыщения по сравнению с электротехническими сталями и сравнительно высокая стоимость.

При использовании пермаллоя для изготовления сердечника тягового трансформатора следует учитывать воздействие внешних механических факторов. Так, для установки в кузове подвижного состава тяговые электрические аппараты должны соответствовать требованиям группы механического исполнения M25 по ГОСТ 30631–99. Таким образом, при использовании сердечника из пермаллоя конструкцией трансформатора должно предусматриваться пониженное воздействие механической вибрации и одиночных ударов.

Также следует отметить, что у высокопроницаемых пермаллоев индукция насыщения не превышает 0,75 Тл. У аморфных сплавов при частоте переменного напряжения 1 кГц допустимое насыщение магнитопровода составляет 1,4 Тл. Отсюда следует, что величина габаритных размеров магнитопровода, зависящая от индукции насыщения, при одинаковой мощности трансформатора, выполненного из пермаллоя, будет больше, чем у сердечника из аморфной стали.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что при частоте напряжения 1 кГц и выше применение пермаллоя для изготовления магнитопровода трансформатора нецелесообразно.

Особенно актуальной является задача создания для ЭПС статического преобразователя, обладающего высокой энергоэффективностью. Как отмечалось ранее, для согласования величин напряжения контактной сети и тяговых двигателей в преобразовательную систему обязательно включают тяговый трансформатор. Для уменьшения потерь энергии сердечник такого трансформатора целесообразно выполнить из аморфной стали.

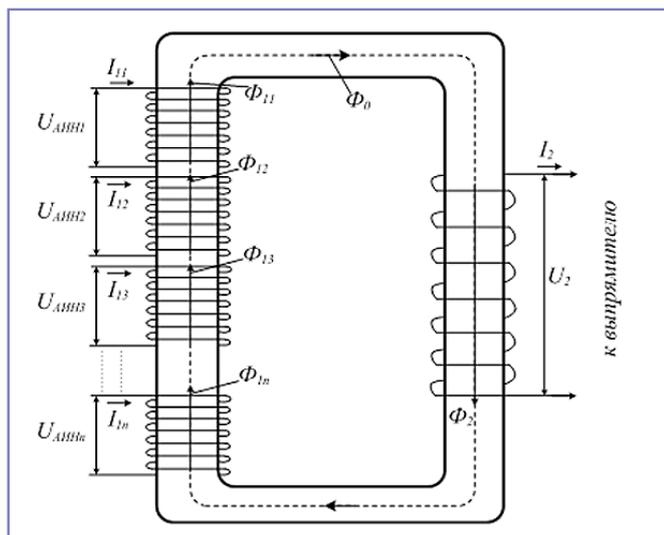


Рис. 1. Магнитная характеристика аморфной стали

Аморфная сталь, магнитная характеристика которой представлена на рис. 1, применяется при изготовлении магнитопроводов распределительных трансформаторов в Японии, Китае, России, Франции и других странах. Аморфные стали представляют собой магнитомягкие материалы, для которых характерно неупорядоченное расположение атомов в пространстве по сравнению с кристаллическими сталями, которые применяются в настоящее время в магнитных системах электротехнических устройств.

Трансформаторы с магнитопроводами из аморфной стали выпускают в РФ для эксплуатации на распределительных подстанциях промышленного исполнения. Для уменьшения потерь энергии в тяговом трансформаторе ЭПС также целесообразно изготовить магнитопровод этого трансформатора из аморфной электротехнической стали. Установка тягового трансформатора с сердечником из аморфной стали возможна как на вновь разрабатываемом ЭПС, так и на существующем при проведении среднего и капитального ремонтов.

Выпускаемые в настоящее время силовые IGBT-модули не допускают последовательного соединения, поэтому входной преобразователь выполняют из нескольких последовательно соединенных автономных инверторов напряжения (АИН). После выходного преобразователя установлен согласующий трансформатор Т, эскиз магнитной цепи которого представлен на рис. 2.

Особенность такого трансформатора (рис. 2) в том, что его первичная обмотка будет состоять из отдельных

секций, работающих синхронно. Поэтому обязательным условием при последовательном соединении инверторов будет являться синхронная коммутация силовых полупроводниковых приборов во всех инверторах.

Реальная кривая суммарного магнитного потока  $\Phi_0$ , образуемого секционированной первичной обмоткой, будет отличаться от синусоидальной. Разница во времени включения силовых ключей инверторов может отрицательно влиять на форму кривой суммарного магнитного потока  $\Phi_0$ , а также исказить форму кривых напряжения  $U_2$  и тока  $I_2$  вторичной обмотки и, как следствие, породить пульсации магнитного потока  $\Phi_0$ . Данные пульсации потока  $\Phi_0$ , обусловленные несинхронной коммутацией силовых ключей инверторов, приведут к дополнительным потерям на гистерезис и вихревые токи в стали сердечника трансформатора. Применение аморфной стали при изготовлении сердечника позволит снизить потери и при этом увеличить КПД трансформатора.

Рассмотрим возможность установки данного трансформатора на электропоезде постоянного тока с напряжением в контактной сети, равным 24 кВ.

Структура силовой цепи электрооборудования моторного вагона (рис. 3) электропоезда содержит входной преобразователь, состоящий из последовательно соединенных автономных инверторов напряжения (АИН) [2].

Для уменьшения стоимости изготовления АИН1.n целесообразно реализовать схему полумостового инвертора, при которой два IGBT-модуля соединяются последовательно и параллельно

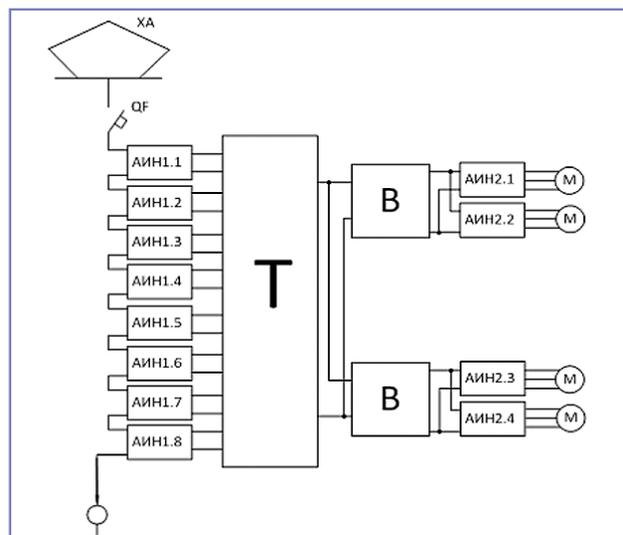


Рис. 2. Эскиз магнитной цепи согласующего трансформатора

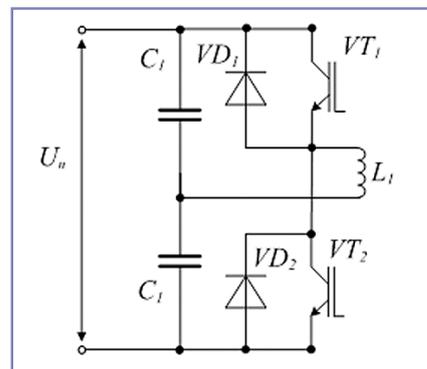


Рис. 3. Структурная схема силовой цепи моторного вагона электропоезда

им подключаются два конденсатора, соединенных между собой последовательно (рис. 4).

Нагрузкой для данного инвертора является индуктивность  $L_1$  (секция обмотки тягового трансформатора), которая обладает активным и реактивным сопротивлением.

Для определения величин токов и напряжений в первичной обмотке тягового трансформатора создана модель входного инвертора напряжения в среде математического моделирования MATLAB (рис. 5) с учетом расчетных величин и характеристик тягового трансформатора для электропоезда.

Полученные на этой модели значения тока и напряжения секции первичной обмотки согласующего трансформатора представлены на рис. 6.

Из полученных кривых напряжения, хорошо коррелирующих с аналогичными кривыми, приведенными в [3], видно, что величина входного напряжения 4000 В, приложенного к последовательно соединенным конденсаторам,

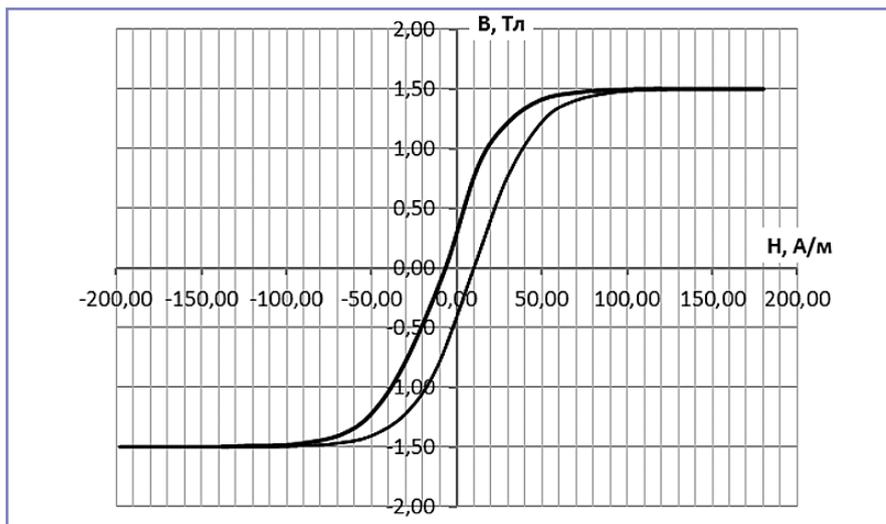


Рис. 4. Принципиальная схема входного инвертора напряжения

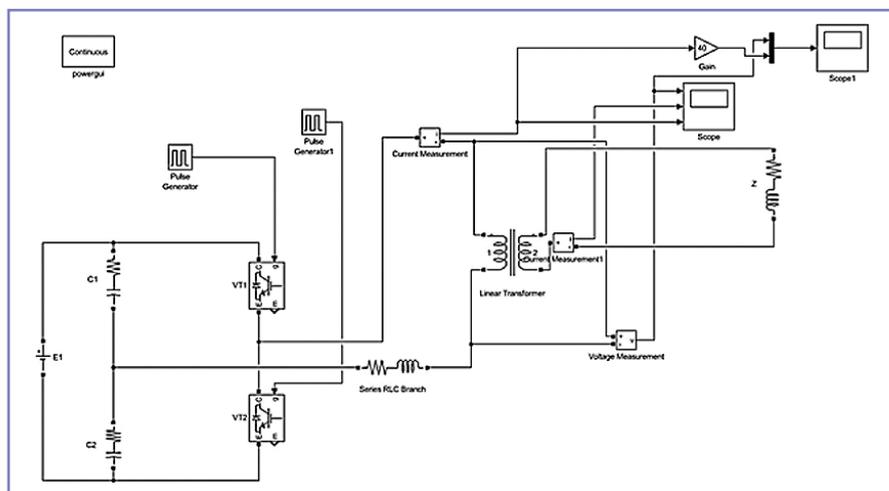


Рис. 5. Модель автономного инвертора напряжения в среде MATLAB

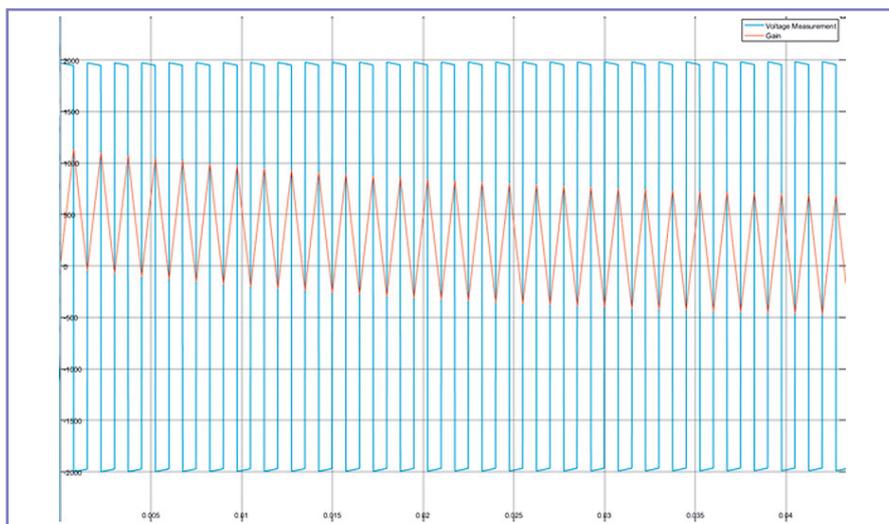


Рис. 6. Кривые напряжения тока первичной обмотки трансформатора

раскладывается пополам между конденсаторами  $C_1$  и  $C_2$ . В соответствии с этим действующее значение напряжения IGBT-модулей будет равно значению напряжения на конденсаторах. После

завершения переходного процесса вследствие большой частоты коммутации силовых ключей кривая тока секции первичной обмотки приобретает форму знакопеременной экспоненты.

### Литература

1. Уровень напряжения электрических сетей как фактор повышения производительности и конкурентоспособности железнодорожного транспорта / А.Т. Бурков // Материалы 3-го Международного симпозиума «Элтранс-2005», 15–17 ноября 2005 г. – СПб.: ПГУПС, 2007.
2. Устройства силовой электроники железнодорожного транспорта подвижного состава: учебное пособие / В.М. Антюхин, А.А. Богомяков, Ю.А. Евсеев и др.; под ред. Ю.М. Инькова и Ф.И. Ковалева. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 471 с.
3. Асинхронный тяговый привод локомотивов: учебное пособие / А.А. Андрущенко, Ю.В. Бабков, А.А. Зарифьян и др.; под ред. А.А. Зарифьяна. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 413 с.
4. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. Учебник для студентов высших технических учебных заведений. – М.: УМК МПС РФ, 2002. – 640 с.

### Иньков Юрий Моисеевич

Родился в 1937 году. В 1954 году окончил Московский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Инженер – электромеханик путей сообщения». Доктор технических наук, профессор. В 1978 году защитил диссертацию по теме «Вероятностные методы расчета полупроводниковых преобразователей электроэнергетики». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время – профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). Имеет более 200 научных трудов, в том числе монографии, и более 100 авторских свидетельств и патентов. Заслуженный деятель науки РФ, имеет 5 государственных наград, знаки «Почетный работник транспорта России» и «Почетный железнодорожник».

### Глызин Илья Игоревич

Родился в 1987 году. В 2010 году окончил Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС) по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает ведущим инженером-конструктором в ОАО «Коломенский завод».

### In'kov Yuriy

Was born in 1937. In 1954 he graduated from Moscow Institute of Railway Transport Engineers, speciality is «Railway transport engineer – electrician». He is a Doctor of Engineering, a professor. In 1978 he defended a thesis, the theme is «Probabilistic computing methods of power semiconductor converters». He has 50 year work experience. At present he works as a professor of «Trains and locomotives» department of Russian University of Transport. He has more than 200 scientific works, including monographs and more than 100 author's certificates and patents. He is a Honored scientist of Russia, he has 5 state awards, «Honored transport worker of Russia» and «Honored railway worker» signs.

### Glyzin Ilya

He was born in 1987. In 2010 he graduated from the Ural State University of Railway Transport (USURS) majoring in Electric Transport of Railways. He has 5 years of work experience. At present he works as a design engineer in PJSC Kolomensky Zavod.

# Расчет мощности присоединения тяговых подстанций ОАО «РЖД» и метрополитенов

// Calculation of the connection power of traction substations  
of JSC «Russian Railways» and subways //

**Гречишников В.А., д.т.н., доцент, Шаламай И.В.,  
Власов С.П., д.т.н., профессор,  
Сорокина А.В., к.э.н., доцент, Куров Н.Д.,  
РУТ (МИИТ), Москва**

*Расчет мощности присоединения тяговых подстанций является многоаспектным и сложным вопросом, сочетающим сложность определения множественной резкопеременной тяговой нагрузки, противоречивые требования СНиП, ПУЭ, ГОСТ, Рекомендаций и Постановлений правительства о правилах доступа к электрическим энергосетям, экономические предпочтения проектных и эксплуатирующих организаций, безопасность пассажиров, вероятностный характер аварийных и нештатных режимов работы системы тягового и внешнего электроснабжения. В статье представлен анализ различных подходов к определению мощности присоединения тяговых подстанций, даны рекомендации по их применению, рассмотрены недостатки ряда подходов. Полномасштабный анализ должен включать экономические расчеты различных вариантов, однако, во-первых, экономические последствия аварий, как и их масштаб, сложно спрогнозировать и оценить, а во-вторых, уже электротехнические расчеты показывают нецелесообразность снижения расходов на присоединение.*

*Ключевые слова:* мощность присоединения, тяговая подстанция, анализ потребления, питающий центр.

Нагрузка на энергосистему ОАО «РЖД» и метрополитенов постоянно возрастает вследствие роста пассажиропотока, ввода более мощного электроподвижного состава, строительства новых станций, увеличения скоростей движения на отдельных перегонах, изменения разгонных характеристик, увеличения полезной нагрузки составов и т.д. Это обуславливает практическую и экономическую необходимость

*Calculating the power of connection of traction substations is a multidimensional and complex issue. The complexity of the definition of multiple sharply variable traction loads, sometimes contradictory requirements of SNiP, PUE, GOSTs, Recommendations and Government Decrees on the rules for access to electric power networks, the economic preferences of design and operating organizations, the safety of passengers, the probabilistic nature of emergency and abnormal operating modes of the system traction and external power supply. The article analyzes all possible approaches to determining the power of connection of traction substations, explains the fraughtness of some of them, gives recommendations on their application. Of course, full-scale analysis should include economic calculations of various options, but first, the economic consequences of accidents, like their scale, are difficult to predict and evaluate, and secondly, already the electrical engineering calculations show the failure of the race to reduce the costs of accession.*

*Keywords:* connection power, power supply substation, consumption analysis, nutrition center.

модернизации и усиления системы тягового энергоснабжения.

При строительстве новых тяговых подстанций и модернизации существующих встает вопрос подключения к сетям энергосбытовых компаний. Для подключения необходимо определить мощность присоединения. Сложность решения данного вопроса определяется множественной резкопеременной тяговой нагрузкой. Также необходимо

учитывать противоречивые требования СНиП, ПУЭ, ГОСТ, Рекомендаций и Постановлений правительства о правилах доступа к электрическим энергосетям.

Как правило, существующие методики пригодны для нормального режима работы системы тягового электроснабжения, однако, как показывают исследования, далеко не все методики дают правильные рекомендации по мощности присоединения для аварийных режимов.

Анализ всех существующих методик, а также учет теоретически возможных методик расчета мощности присоединения позволяет составить следующие варианты расчета:

1. по пиковому значению;
2. как установленную мощность агрегатов;
3.  $I_{\text{тп ср}} * U_{\text{тп хх}}$ ;
4.  $I_{\text{тп ср}} * U_{\text{тп хх}} * 1,05$ ;
5.  $I_{\text{тп ср}} * U_{\text{тп ср}}$ ;
6.  $I_{\text{тп эф}} * U_{\text{тп хх}}$ ;
7.  $I_{\text{тп эф}} * U_{\text{тп хх}} * 1,05$ ;
8.  $I_{\text{тп эф}} * U_{\text{тп ср}}$ ,

где  $I_{\text{тп ср}}$  – средний ток тяговой подстанции за расчетный период;

$U_{\text{тп хх}}$  – напряжение холостого хода на шинах тяговой подстанции;

$U_{\text{тп ср}}$  – среднее напряжение на шинах тяговой подстанции за расчетный период;

$I_{\text{тп эф}}$  – эффективный ток тяговой подстанции за расчетный период.

Наверное, можно было бы придумать определение мощности тяговой подстанции с использованием эффективного значения напряжения на шинах тяговой подстанции за расчетный период, однако, хоть математически такую величину и можно получить, но физического смысла она не имеет.

Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2004 года № 861 в редакции от 30.09.2015 четко устанавливает порядок расчета:

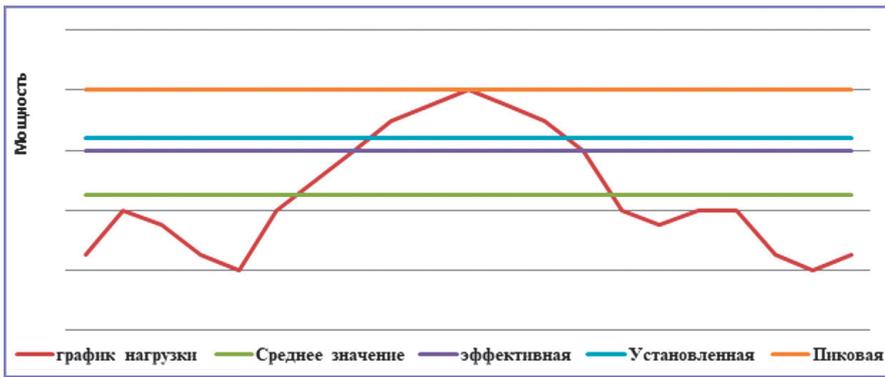


Рис. 1. График зависимости мощности тяговой подстанции от времени и уровня средней, эффективной, установленной и пиковой мощностей для этой зависимости

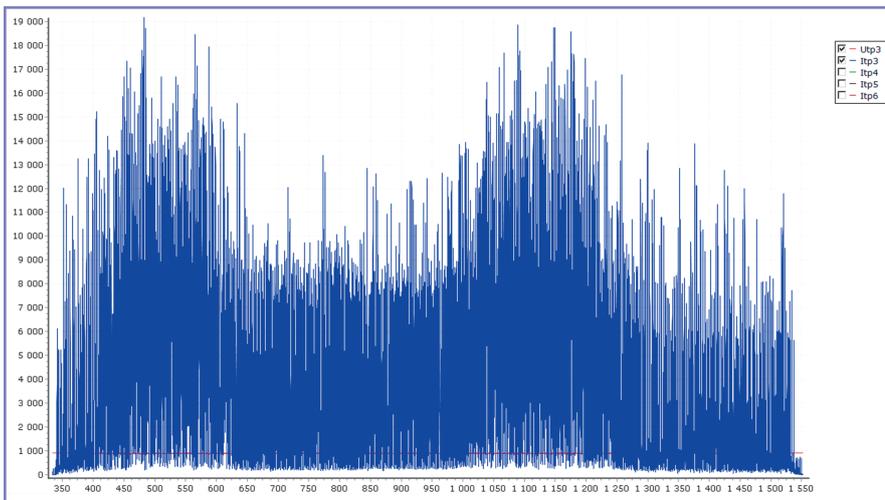


Рис. 2. График тока тяговой подстанции метрополитена, полученный в результате моделирования

энергопринимающих устройств, технологически присоединенных в установленном законодательством Российской Федерации порядке к электрической сети, определенная в соответствии с пунктом 13.1 настоящих Правил, с распределением указанной величины по каждой точке поставки;

- пункт 13.1. Величина максимальной мощности энергопринимающих устройств (объектов электросетевого хозяйства) определяется в процессе технологического присоединения или в соответствии с разделом IV Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям и указывается в документах о технологическом присоединении, если иное не установлено настоящим пунктом.

Как показывает анализ данных подходов, результирующее значение мощности присоединения может отличаться более чем в два раза, как это показано на рис. 1.

Для анализа всех возможных режимов потребления тяговых подстанций и питающих центров использован программный комплекс по расчету системы тягового электроснабжения с учетом работы энергосистемы на уровнях напряжений 3,3; 27,5; 10; 35; 110 и 220 кВ, разработанный на кафедре «Электроэнергетика транспорта» Российского университета транспорта (МИИТ) [2, 5]. Система уравнений, описывающая работу системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава с учетом переходных процессов [1, 6], представлена далее:

- пункт 2. «Максимальная мощность» – наибольшая величина мощности, определенная к одномоментному использованию энергопринимающими устройствами (объектами электросетевого хозяйства) в соответствии с документами о технологическом присоединении и обусловленная составом энергопринимающего оборудования (объектов

электросетевого хозяйства) и технологическим процессом потребителя, в пределах которой сетевая организация принимает на себя обязательства обеспечить передачу электрической энергии, исчисляемая в мегаваттах;

- пункт 13. Договор должен содержать следующие существенные условия: а) величина максимальной мощности

$$\left\{ \begin{aligned} \left( \frac{dI}{dt} \right)^{(K)} &= \left( B \times \left( L^{(B)} + \sigma \sigma_{\text{диаг}}^{(B)} \times \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_{\text{диаг}}^{(B)} \right) \times B^T \right)^{-1} \times \left( B \times \left( E^{(B)} - R^{(B)} \times B^T \times I^{(K)} - U_C^{(B)} - C C_{\text{столб}}^{(B)} \cdot \times \cdot V_{\text{столб}}^{(B)} \cdot \times \cdot \Phi_{\text{столб}}^{(B)} \right) \right) \\ \left( \frac{dU_C}{dt} \right)^{(B)} &= \left[ \frac{1}{C} \right]^{(B)} + I^{(B)} \\ \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} &= P1_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot I_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \div \cdot m d_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} + P2_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \Phi1_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} - P3_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \Phi_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} - P4_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \operatorname{atanh} \left( c_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \left( \Phi_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \right)^{\cdot d_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})}} \right) \\ \left( \frac{d\Phi1}{dt} \right)_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} &= P5_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot I_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \div \cdot m d_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} - P6_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \Phi1_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} - P7_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \operatorname{atanh} \left( c_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \left( \Phi_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \right)^{\cdot d_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})}} \right) \\ \left( \frac{dV}{dt} \right)_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} &= \xi_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \frac{\left( P8_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot I_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \Phi_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \div \cdot m d_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} - \left( \frac{1}{P+Q} \right)_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot \left( \omega_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot P_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} - \omega_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \cdot \times \cdot Q_{\text{столб}}^{(\text{ЛОК})} \right) - U_{\text{КЛ}}^{(\text{ЛОК})} \right)}{3600} \end{aligned} \right.$$

$$\varphi_{\text{УЗЛ}} = \left( A_{\text{дерево}}^T \right)^{-1} \times \left( R_{\text{дерево}}^{(B)} \times I_{\text{дерево}}^{(B)} + L_{\text{дерево}}^{(B)} \times \left( \frac{dI}{dt} \right)_{\text{дерево}}^{(B)} + U_C^{(B)} + C C_{\text{дерево}}^{(B)} \cdot \times \cdot V_{\text{дерево}}^{(B)} \cdot \times \cdot \Phi_{\text{дерево}}^{(B)} + \sigma \sigma_{\text{дерево диаг}}^{(B)} \times \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_{\text{дерево диаг}}^{(B)} \times \left( \frac{dI}{dt} \right)_{\text{дерево}}^{(B)} - E_{\text{дерево}}^{(B)} \right).$$

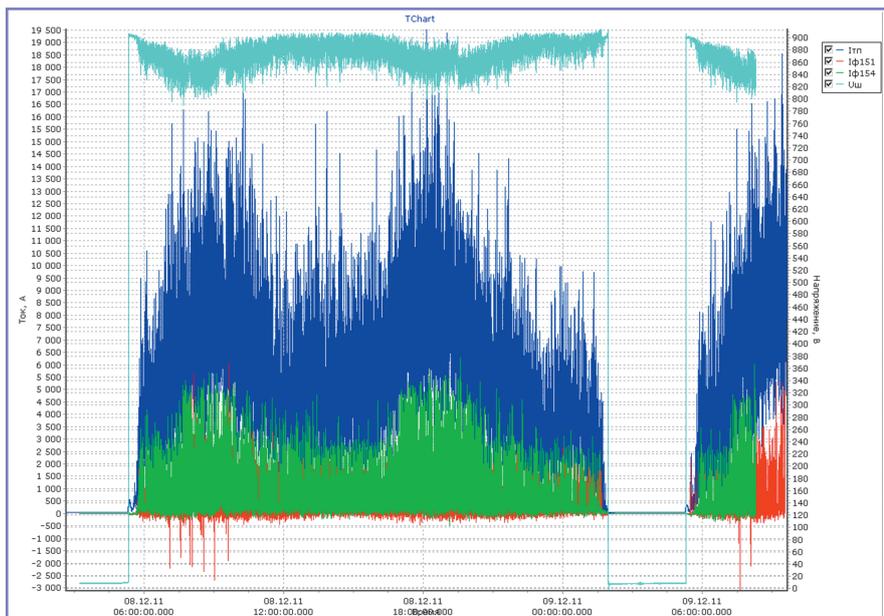


Рис. 3. Графики тока и напряжения тяговой подстанции метрополитена, полученные в результате измерений

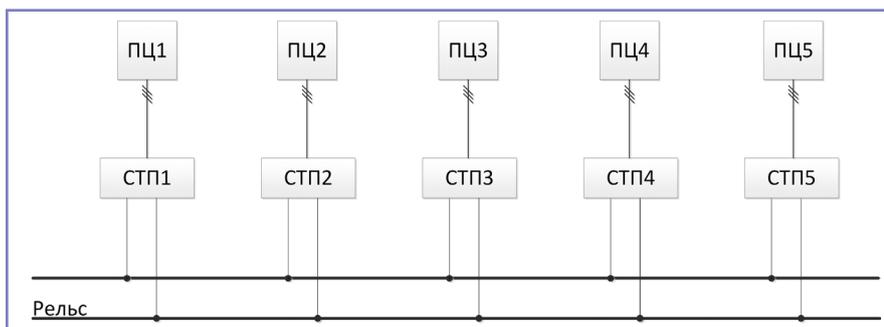


Рис. 4. Нормальный режим работы системы тягового электроснабжения

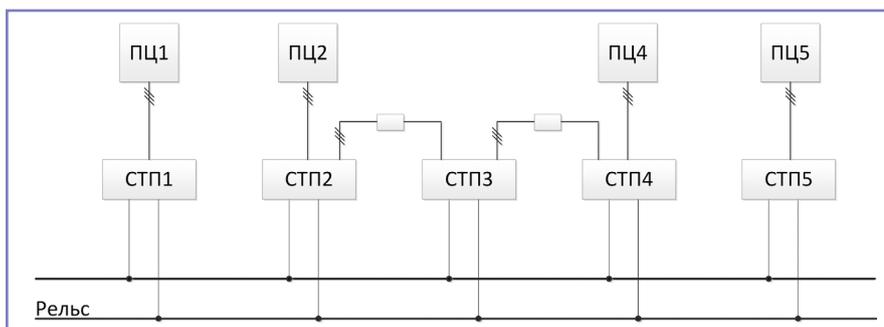


Рис. 5. Аварийный режим работы системы тягового электроснабжения при выпадении ПЦ3

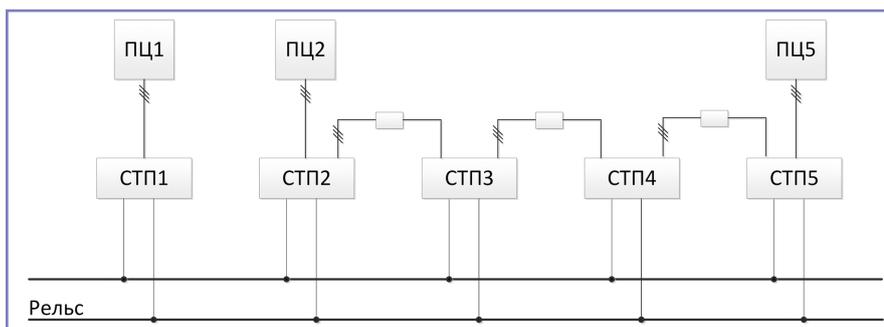


Рис. 6. Аварийный режим работы системы тягового электроснабжения при выпадении ПЦ3 и ПЦ4

Адекватность модели доказана сравнением многочисленных замеров на действующих подстанциях Московского метрополитена и результатов моделирования [3, 4]. Сравнение результатов моделирования и реальных замеров представлено на рис. 2 и 3.

Расчетные схемы для сравнения различных подходов к расчету мощности присоединения представлены на следующих рисунках. На рис. 4 показана нормальная схема электроснабжения тестового участка метрополитена, в которой нет аварий и каждую тяговую подстанцию (ТП) питает свой питающий центр (ПЦ). На рис. 5 представлена аварийная схема с выпадением питающего центра № 3. В такой схеме питание совмещенной тяговой подстанции (СТП) 3 осуществляется по кабельным перемычкам 10 кВ от СТП 2 и СТП 4. Рис. 6 показывает более глобальную аварию с выпадением нескольких питающих центров.

Результаты сравнения всех подходов к расчету мощности присоединения представлены в таблице 1.

Произведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что при выпадении питающего центра неминуемо происходит увеличение нагрузки на соседние питающие центры, поскольку процесс движения электропоездов надо энергетически обеспечить.

В нормальных режимах работы (схема 1) мощность подключения, рассчитанная по методу среднего тока тяговой подстанции (первые три строки таблицы), близка к средней мощности ПЦ (последняя строка таблицы). Эта методика показывает наименьшее значение мощности присоединения и очень нравится проектным организациям, так как позволяет меньше платить за присоединение.

Даже при самых незначительных отказах системы (аварийный режим по схеме 2 или иные нештатные режимы в самой системе тягового электроснабжения или системе внешнего электроснабжения) на соседние питающие центры ложится нагрузка, не заложенная в заявленной мощности, рассчитанной по вариантам  $I_{тр\ ср} * U_{тп\ хх}$ ;  $I_{тр\ ср} * U_{тп\ хх} * 1,05$ ;  $I_{тр\ ср} * U_{тп\ ср}$ ;  $I_{тр\ эф} * U_{тп\ хх}$ ;  $I_{тр\ эф} * U_{тп\ хх} * 1,05$ ;  $I_{тр\ эф} * U_{тп\ ср}$  (видно из сравнения цифр нормального режима по схеме 1 и мощности ПЦ2 и 4 схемы 2). Следовательно, при полном отсутствии у районной подстанции запаса свободной мощности это может привести

Таблица 1. Результаты расчета мощностей тяговых подстанций и питающих центров

	Схема 1					Схема 2					Схема 3				
	ТП 1	ТП 2	ТП 3	ТП 4	ТП 5	ТП 1	ТП 2	ТП 3	ТП 4	ТП 5	ТП 1	ТП 2	ТП 3	ТП 4	ТП 5
Иср тп * Уср тп	2,90	2,98	2,76	2,67	2,76	3,01	2,90	2,63	2,53	2,90	3,15	2,80	2,59	2,54	2,75
Иср тп * Ухх тп	2,81	2,90	2,67	2,58	2,67	2,93	2,85	2,57	2,47	2,82	3,07	2,77	2,56	2,51	2,71
Иср тп * Ухх тп * 1,05	2,95	3,05	2,80	2,71	2,81	3,08	2,99	2,70	2,59	2,96	3,23	2,91	2,69	2,63	2,85
Иэф тп * Уср тп	3,69	3,60	3,14	3,50	3,79	3,76	3,63	3,05	3,54	3,87	3,87	3,54	3,01	3,48	3,82
Иэф тп * Ухх тп	3,58	3,50	3,04	3,38	3,66	3,65	3,56	2,98	3,45	3,75	3,78	3,50	2,98	3,44	3,78
Иэф тп * Ухх тп * 1,05	3,76	3,68	3,19	3,55	3,85	3,83	3,74	3,13	3,62	3,94	3,97	3,68	3,13	3,61	3,97
Установленная мощность	6,4					6,4					6,4				
Пиковая Imax * Umax	7,79	7,69	7,26	9,67	12,45	7,84	7,91	7,18	10,38	12,47	8,13	7,85	7,09	10,09	12,97
Номер ПЦ	ПЦ 1	ПЦ 2	ПЦ 3	ПЦ 4	ПЦ 5	ПЦ 1	ПЦ 2		ПЦ 4	ПЦ 5	ПЦ 1	ПЦ 2			ПЦ 5
Мощность ПЦ (эф.)	3,78	3,71	3,26	3,56	3,83	3,86	4,67		4,65	3,92	3,99	6,16			6,25
Мощность ПЦ (ср.)	2,99	3,09	2,87	2,74	2,83	3,12	4,21		4,16	2,98	3,27	5,54			5,52

к цепной реакции. Когда из системы выпадает ПЦ, происходит пропорциональное распределение дефицита мощности, возникшего в энергетических сетях, на соседние (90–95%) и даже на отдаленные ПЦ (5–10%). Это обстоятельство необходимо учитывать при выполнении технологического присоединения.

Постановление Правительства № 861 рекомендует выполнять присоединение по максимальной единовременной мощности – при таком методе не страшны даже самые тяжелые аварийные режимы (строка «Пиковая мощность» в таблице 1, значения в ней выше любых потреблений ПЦ). Запас будет избыточным и, следовательно, дорогостоящим с точки зрения затрат на присоединение, но дешевым при аварийных режимах.

Лучшим методом для определения мощности присоединения будет производство индивидуальных расчетов, учитывающих аварийные режимы, все уровни напряжений, кабельные перемычки, профиль пути, длины участков, элементы тяговой сети, параметры этих элементов, подвижной состав.

При упрощенных расчетах следует исходить из установленной мощности силового оборудования тяговых подстанций.

### Литература

- Гречишников В.А. Аналитические аспекты возможности выравнивания напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока / В.А. Гречишников, С.П. Власов, И.В. Шаламай, Н.Д. Куров // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 11–18.
- Гречишников В.А. Расчет системы тягового электроснабжения метрополитена с учетом

частичных токов рекуперации, отдаваемых вагонами типа «Русич» [Текст] / В.А. Гречишников // Электротехника. – 2010. – № 5. – С. 29–33.

3. Гречишников В.А. Повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена с использованием 12-пульсовых преобразовательных агрегатов / В.А. Гречишников, М.П. Бадёр, П.Ф. Бестемьянов, М.В. Шевлюгин, Данг Вьет Фук // Практическая силовая электроника. – 2016. – № 2. – С. 38–43.

4. Бадёр М.П. Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга показателей АСКУЭ тяговых подстанций в режиме реального времени [Текст] / М.П. Бадёр, В.А. Гречишников, Ю.Н. Король, М.В. Шевлюгин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 5–6. – С. 5–8.

5. Андреев В.В. Расчет интегральных показателей работы разветвленных систем тягового электроснабжения [Текст] / В.В. Андреев, В.А. Гречишников, М.В. Шевлюгин // Электротехника. – 2012. – № 12. – С. 32–36.

6. Гречишников В.А. Развитие методологии расчета систем тягового электроснабжения. [Текст] / В.В. Андреев, В.А. Гречишников, Ю.Н. Король, М.В. Шевлюгин // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 8. – С. 32–34.

### Гречишников Виктор Александрович

Родился в 1974 году. В 1996 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог». Доктор технических наук, доцент. В 2014 году защитил докторскую диссертацию на тему «Измерительно-аналитическая программно-аппаратная система защиты и диагностики основного оборудования

тяговых подстанций постоянного тока». Опыт работы – 21 год. В настоящее время работает первым заместителем директора – начальником учебного отдела Института транспортной техники и систем управления РУТ (МИИТ), профессором кафедры «Электроэнергетика транспорта». Имеет 93 научных труда и патенты.

### Шаламай Ирина Валерьевна

Родилась в 1990 году. В 2013 году окончила Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». Опыт работы – 7 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ). Имеет 17 научных трудов.

### Власов Станислав Петрович

Родился в 1940 году. В 1963 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». Доктор технических наук, профессор. В 1992 году защитил диссертацию на тему «Совершенствование системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов». Опыт работы – 53 года. В настоящее время работает профессором кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ). Имеет 52 научных труда.

### Сорокина Анастасия Владимировна

Родилась в 1980 году. В 2002 году окончила Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Экономика и управление на предприятии». Кандидат экономических наук, доцент. В 2005 году защитила диссертацию на тему «Экономическое обоснование организации

корпоративного управления на железнодорожном транспорте». Опыт работы – 18 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Экономика и управление на транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ). Имеет более 50 научных трудов.

**Куров Никита Дмитриевич**

Родился в 1994 году. В 2016 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Системы обеспечения движения поездов». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает ассистентом кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ). Имеет 5 научных трудов.

**Grechishnikov Viktor**

Was born in 1974. In 1996 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering majoring in «Power supply of electrified railways». He is Doctor of Technical Science, associate professor. In 2014 he defended the thesis, the subject of thesis is «Measuring and analytical software and hardware protection and diagnostic of the main equipment of direct current

traction substations». He has 21 years of work experience. At present he works as First Deputy Director – Head of training division of Russian University of Transport, professor of «Transport electric power engineering» department of Russian University of Transport. He has 93 scientific works and patents.

**Shalamai Irina**

Was born in 1990. In 2013 she graduated from Moscow State University of Railway Engineering majoring in «Electric supply of railways». She has 7 years of work experience. At present she works as Head teacher of «Transport Electric Supply» department of Russian University of Transport. She has 17 scientific works.

**Vlasov Stanislav**

Was born in 1940. In 1963 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering majoring in «Electric supply of railways». He is Doctor of Technical Science, Professor. In 1992 he defended the thesis, the subject of thesis is «25 kV alternate current traction power supply system development by booster transformers». He has 53 years of work experience. At present he works as professor

of «Transport Electric Supply» department of Russian University of Transport. He has 52 scientific works.

**Sorokina Anastasia**

She was born in 1980. In 2002 she graduated from the Moscow State University of Railway Transport (MIIT) majoring in Economics and Enterprise management. Candidate of Economic Sciences, Associate professor. In 2005, she defended her thesis on «The feasibility study for organization of corporate management in railway transport». She has 18 years of work experience. At present she works as an assistant professor at the Transport Economics and Management Department of the Russian University of Transport. He has more than 50 scientific papers.

**Kurov Nikita**

Was born in 1994. In 2016 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering majoring in «Trains running service system». He has 3 years of work experience. At present, he is assistant of «Transport Electric Supply» department of Russian University of Transport. He has 5 scientific works.

# Заземление металлических ограждений посадочных платформ на электрифицированных участках переменного тока

// Earthing of metal enclosures of landing platforms on electrified sections of alternating current //

**Косарев Б.И., д. т. н., профессор,  
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва**

**Косарев И.А., к. т. н.,  
АО «ВНИИЖТ», Москва**

*В статье предложены технические решения по заземлению металлических ограждений посадочных платформ на электрифицированных участках переменного тока. В основу предлагаемой системы заземления металлических ограждений посадочных платформ положены следующие принципы: создание эквипотенциальных зон в местах нахождения персонала; использование экранирующего эффекта металлических полос, позволяющих снизить до допустимых пределов наведенные в металлических ограждениях посадочных платформ напряжения, обусловленные магнитным влиянием токов в тяговой сети; применение с целью снижения наведенных напряжений естественных заземлителей, в частности фундаментов опор, на которых расположены освещение посадочных платформ, устройства видеонаблюдения и прочие устройства. Предложена методика расчета магнитного и гальванического влияний тяговых сетей на металлические сооружения, учитывающая распределенные по длине первичные параметры системы заземления металлических ограждений посадочных платформ железнодорожных путей. Разработана методика оценки условий электробезопасности при прикосновении человека к металлическим ограждениям, учитывающая случайный характер прикосновения пассажиров при их нахождении на платформах.*

*Ключевые слова:* заземление, металлические ограждения посадочных платформ, электробезопасность, напряжения «Рельсы – земля», искусственный заземлитель, трос группового заземления.

*The article proposes technical solutions for grounding metal fences of landing platforms on electrified AC sections. The following principles are based on the proposed system for grounding metal fences of landing platforms: creation of equipotential zones in the locations of personnel; the use of the shielding effect of metal strips, allowing to reduce to the permissible limits the voltage induced in the metal enclosures of the landing platforms, caused by the magnetic influence of the currents in the traction network; application to reduce induced voltages natural grounders, in particular foundations of supports, which are illuminated landing platforms, video surveillance devices and other devices. A technique is proposed for calculating the magnetic and galvanic effect of traction networks on metal structures, taking into account the primary parameters of the earthing system for metal fences of the railroad landing platforms. A technique for assessing electrical safety conditions when a person touches metal fences is developed, taking into account the casual nature of touching passengers when they are on platforms.*

*Keywords:* grounding, metal fencing of landing platforms, electrical safety, rail-earth voltages, artificial earthing switch, group grounding cable.

В настоящее время отсутствуют технические решения по заземлению металлических ограждений посадочных платформ на электрифицированных участках переменного тока. Это обусловлено тем, что в существующих нормативных документах, в частности в Инструкции ЦЭ-191 [1], нет конкретных требований и, соответственно, предложений по заземлению металлических ограждений посадочных платформ и металлических ограждений при длине более 400 м. В значительной мере это касается случаев, когда отсутствуют данные об уровнях напряжений, возникающих на металлических ограждениях посадочных платформ как при нормальном режиме работы системы тягового электроснабжения, так и при возникновении аварийных режимов.

Имеющиеся в этой части исследования, посвященные вопросу обеспечения электробезопасности при работах в зонах электромагнитного влияния в целом, имеют ряд существенных недостатков.

Так, практически все задачи по оценке условий электробезопасности решаются в детерминированной постановке, то есть считается, что допустимые по условиям обеспечения электробезопасности напряжения фиксированы соответствующими нормативными документами. Принято также считать, что напряжения, вносимые в зону нахождения персонала, определяются из условия их максимальных значений. Эти максимальные значения не должны превышать допустимых. При таких условиях работать на электрифицированных участках магистральных железных дорог нельзя.

Действительно, при возникновении режима короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока уровни напряжений «Рельсы – земля» достигают значений, существенно превышающих 1,0 кВ [2, 3], то есть существенно превышающих допустимые значения. В то же время нет статистических данных о поражении

персонала напряжениями «Рельсы – земля». Это, на наш взгляд, объясняется очень малой вероятностью поражения электрическим током персонала, связанного с обслуживанием устройств, заземленных на рельсовый путь.

Наиболее объективный и всесторонний анализ безопасности труда можно провести только с использованием аппарата теории вероятности и математической статистики при учете случайного характера явлений, приводящих к электротравме.

Исследования условий электробезопасности, обоснование и выбор средств защиты от электропоражения основываются на сведениях о значении вероятности  $P\{U_{B3Y} > U\}$ , именуемой в дальнейшем вероятностью безопасной работы [2, 6].

Известно, что условия электробезопасности обслуживания устройств электроснабжения обеспечиваются, если соблюдается неравенство  $U_B > U_{3Y}$ , где  $U_B$  – воздействующие напряжения на устройствах электроснабжения,  $U_{3Y}$  – допустимые по условиям обеспечения электробезопасности напряжения на устройствах электроснабжения.

Для количественной оценки электробезопасности необходимо знать распределение случайной величины  $U = U_B - U_{3Y}$ .

Плотность  $g(U)$  и функция  $G(H)$  распределения величины  $U$  в общем виде имеют вид [7]

$$\left. \begin{aligned} g(U) &= \int_{U_B}^{\infty} f_{U_B}(U_B) f_{U_{3Y}}(U_B - U) dU_B; \\ G(U) &= \int_{-\infty}^{\infty} dU \int_{U_B}^{\infty} f_{U_B}(U_B) f_{U_{3Y}}(U_B - U) dU_B. \end{aligned} \right\} (1)$$

При нахождении вероятности безопасной работы с использованием выражений (1) необходимо за верхний предел интегрирования принимать ноль, так как условие безопасной работы обслуживающего персонала соблюдается до значения  $U = U_B - U_{3Y}$ .

Методологической основой построения вероятностной модели возникновения опасных ситуаций является сравнение параметров, характеризующих неблагоприятные воздействия производственной среды, с допустимым уровнем для соответствующих фаз технологического процесса.

Наибольшие значения токов короткого замыкания, а также напряжений «Рельсы – земля» при прочих равных условиях соответствуют максимальным мощностям  $S_{max}$  систем первичного

электроснабжения [4, 8]. Распределение сопротивлений  $z_c$  определено в результате обработки значений  $S_{max}$  для тяговых подстанций Восточно-Сибирской железной дороги. При этом, учитывая относительно небольшой объем выборки ( $n = 8$ ), проверка возможности сглаживания статистического распределения логарифмически нормальным законом была выполнена по критерию мощности  $n\omega^2$ . Значение параметров  $n\omega^2 = 0,059$  оказалось значительно меньше критического, что позволило принять логарифмически нормальный закон в качестве аппроксимирующего распределения со следующими параметрами: математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение логарифма сопротивления первичной систем электроснабжения, соответственно,  $m_{lgz_c} = -0,09995$  и  $\sigma_{lgz_c} = 0,23633$ . Данному распределению  $z_c$  соответствуют математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение сопротивления  $m_{z_c} = 0,92$  Ом и  $\sigma_{z_c} = 0,54$  Ом. Доверительный интервал изменения  $z_c$  соответствующий доверительной вероятности  $\beta = 0,95$ , равен  $I_{\beta=0,95} = [0,374 - 1,69]$  Ом.

Установлено, что при расчетах вероятности превышения воздействующих напряжений над допустимыми значениями  $P(U_g > U_g)$  можно пренебречь стохастической зависимостью между этими напряжениями и рассматривать их как две независимые случайные величины.

Используя это положение, при логарифмически нормальных распределениях составляющих вероятность  $P_{ut} = P(U_g > U_g)$  несложно вычислить после следующих преобразований [7]:

$$\begin{aligned} P_{ut} &= P(U_g \geq U_g) = P\left(\frac{U_g}{U_g} \geq 1\right) = \\ &= P(\lg U_g - \lg U_g) \geq 0. \end{aligned}$$

Для рассматриваемого случая значения  $\lg U_B = x_1$  и  $\lg U_g = x_2$  распределены по логарифмически нормальным законам, то есть

$$\begin{aligned} x_1 &\sim N_1(m_{lg U_B}; \sigma_{lg U_B}); \\ x_2 &\sim N_2(m_{lg U_g}; \sigma_{lg U_g}). \end{aligned}$$

Плотность вероятности разности случайных независимых величин, распределенных по нормальному закону, также определяется нормальным законом [7]

$$(x_1 - x_2) \sim N_3(m_3; \sigma_3)$$

$$\begin{aligned} m_3 &= m_{lg U_B} - m_{lg U_g}; \\ \sigma_3 &= \sqrt{\sigma_{lg U_g}^2 + \sigma_{lg U_B}^2}. \end{aligned}$$

Если перейти к стандартному распределению, то значение вероятности  $p[(x_1 - x_2) \geq 0]$  находится с помощью таблиц функции Лапласа:

$$\begin{aligned} p[(x_1 - x_2) \geq 0] &= P(U_B > U_g) = \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{m_{lg U_g} - m_{lg U_B}}{\sqrt{\sigma_{lg U_g}^2 + \sigma_{lg U_B}^2}}\right). \end{aligned}$$

Применительно к рельсовому пути допустимые значения напряжений определяются согласно рекомендациям [2] при учете коэффициента прикосновения к рельсовому пути. Получено, что статистики логарифмически нормальных распределений допустимых напряжений несколько ниже, чем на перегоне. В дальнейшем, при расчете вероятности превышения воздействующих напряжений над допустимыми значениями, необходимо пользоваться результатами расчетов, приведенными в [2]. При определении потенциалов «Искусственный заземлитель – земля», обусловленных попаданием рабочего напряжения контактной сети переменного тока на металлические ограждения посадочных платформ, например, при обрыве контактного провода, прием допущение: напряжение «Рельсы – земля» не зависит от сопротивления растекания искусственного заземлителя (ИЗ).

В расчетной схеме для определения потенциала «ИЗ – земля» (рис. 1) обозначим:

- $Z_{ЭI}$  и  $Z_{ЭII}$  – эквивалентные расчетные параметры контактных подвесок двухпутного участка при узловом соединении;
  - $l_3, l_4$  – расстояния от тяговых подстанций I и II до ближайшего соединения искусственного заземлителя с рельсовым путем;
  - $Z_T$  – сопротивление контура «ИЗ – земля»;
  - $Z_{TK}$  – взаимное индуктивное сопротивление между контурами «Эквивалентная контактная подвеска двух путей – земля», «ИЗ – земля»;
  - $l_T$  – длина ИЗ до места его подведения к рельсу;
  - $x$  – текущая координата;
  - $Z_{I2}$  – взаимное индуктивное сопротивление между контурами «Контактная сеть – земля» и «Рельсы – земля».
- При расчете принимается равным взаимному индуктивному сопротивлению между контурами «ИЗ – земля» и «Рельсы – земля».

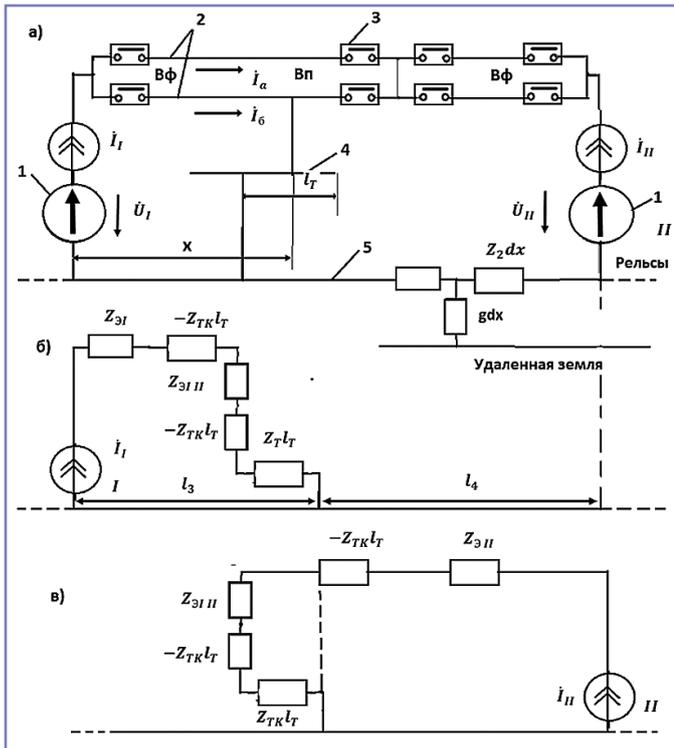


Рис. 1. Схема замещения тяговой сети переменного тока: 1 – тяговые подстанции, 2 – контактная сеть, 3 – пост секционирования, 4 – искусственный заземлитель, 5 – рельсовый путь

Включив, как это показано штриховыми линиями на рис. 1а, источники тока, сделав развязку цепи и используя далее метод сведения расчета тяговой сети с двусторонним питанием к расчету двух схем с односторонним питанием [6], получим схемы, представленные на рис. 1б, 1в. Затем, используя результаты, приведенные в [3, 4], получим выражения для определения токов:

$$\begin{aligned} \dot{I}_I &= \frac{\dot{U}_I Z_{II} - \dot{U}_{II} Z_{I II}}{Z_I Z_{II} - Z_{I II}^2}; \\ \dot{I}_{II} &= \frac{\dot{U}_{II} Z_I - \dot{U}_I Z_{I II}}{Z_I Z_{II} - Z_{I II}^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\dot{I}_I, \dot{I}_{II}, \dot{U}_I, \dot{U}_{II}$  – комплексные значения токов и напряжений холостого хода на шинах тяговых подстанций I и II. При этом

$$\begin{aligned} Z_I &= Z_{ЭI} + Z_{ЭII} + (Z_T - 2Z_{TK})l_T + \\ &+ l_3 \left( -\frac{Z_{12}^2}{Z_2} + \frac{(Z_{12} - Z_2)^2}{Z_2} \cdot \frac{1 - e^{-\gamma l_3}}{\gamma l_3} \right); \\ Z_{II} &= Z_{ЭII} + Z_{ЭI II} + Z_T l_T + \\ &+ l_4 \left( -\frac{Z_{12}^2}{Z_2} + \frac{(Z_{12} - Z_2)^2}{Z_2} \cdot \frac{1 - e^{-\gamma l_4}}{\gamma l_4} \right); \\ Z_{I II} &= Z_{I II}^3 + (Z_T - Z_{TK})l_T + \\ &+ \frac{1}{2} (1 - e^{-\gamma l_3})(1 - e^{-\gamma l_4}) \frac{(Z_{12} - Z_2)^2}{Z_2 \gamma}, \end{aligned}$$

где  $\gamma$  – коэффициент распространения рельсовой сети, равный  $\gamma = \sqrt{Z_2 g}$ ;

контура «ИЗ – земля».

Эквивалентные параметры контактной подвески, а также токораспределение в контактной сети рассчитываются по формулам (при включенных выключателях В<sub>II</sub> и В<sub>Ф</sub>)

$$\begin{aligned} Z_{ЭI} &= Z_{СИ} + \frac{1}{2}(Z_1 + Z_a)l_1; \\ Z_{ЭII} &= Z_{СИ} + \frac{1}{2}(Z_1 + Z_a)l_2; \\ Z_{ЭI II} &= (Z_I - Z_a)(0,5 - \varepsilon)l_1; \\ \varepsilon &= l_1 / 2l_n; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_3 - \dot{I}_{II}(0,5 - \varepsilon); \\ \dot{I}_6 &= \dot{I}_1(1 - \varepsilon) + \dot{I}_{II}(0,5 - \varepsilon), \end{aligned}$$

где  $Z_{СИ}, Z_{СИ}$  – сопротивления системы внешнего энергоснабжения для I и II тяговых подстанций;

$Z_1$  – удельное сопротивление контактной подвески однопутного участка;  
 $Z_a$  – взаимное индуктивное сопротивление между двумя контактными подвесками;  
 $l_n$  – расстояние до поста секционирования;  
 $l_1, l_2$  – расстояния от места короткого замыкания на ИЗ до I и II типов подстанций.

При известном значении токов распределение напряжений на участке от точки подключения искусственного за-

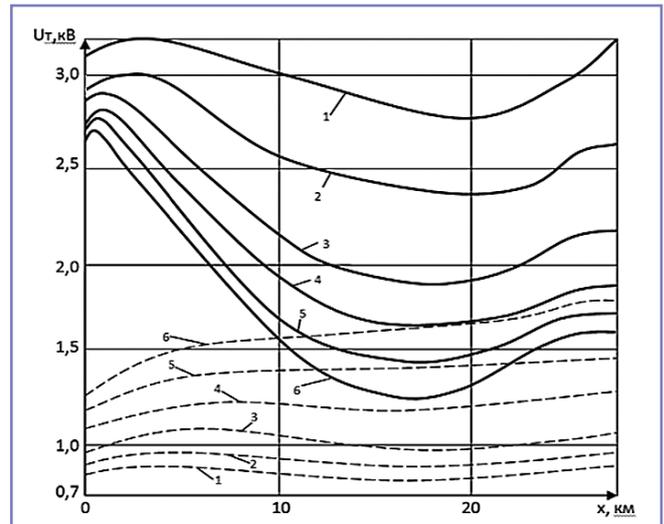


Рис. 2. Результаты расчета распределения напряжений «Искусственный заземлитель – земля» при переходном сопротивлении «Рельсы – земля»:

1 – 0,5 Ом·км; 2 – 2 Ом·км; 3 – 4 Ом·км; 4 – 8 Ом·км; 5 – 12 Ом·км; 6 – 15 Ом·км

$Z_2$  – удельное сопротивление контура «Рельсы – земля»;  
 $g$  – поперечная проводимость

землителя к рельсам и места короткого замыкания определяется из соотношения

$$\begin{aligned} \dot{U}_{и.з.} &= (Z_T - Z'_{TK})(x - l_3)\dot{I}_a + \\ &+ (Z_T - Z''_{TK})(x - l_3)\dot{I}_6 + Z_T(x - l_3)\dot{I}_{II} + \\ &+ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Z_{12}}{Z_2} \right) (1 - e^{-\gamma l_3}) \left[ Z_B - \frac{2Z_{12}}{\gamma} (1 - e^{-\gamma(x-l_3)}) \right] \dot{I}_1 + \\ &+ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Z_{12}}{Z_2} \right) \left[ Z_B (1 - e^{-\gamma l_4}) - \right. \\ &\left. \frac{2Z_{12}}{\gamma} (1 - e^{-\gamma(x-l_3)}) \right] \dot{I}_{II} - \frac{Z_{12}^2}{Z_2} (x - l_3) \dot{I}_{II}. \end{aligned} \quad (4)$$

Волновое сопротивление  $Z_B$  рельсовой цепи рассчитывается по формуле

$$Z_B = \sqrt{Z_2 / g}. \quad (4)$$

Максимальное значение имеет место при  $x = l_3 = l_T$ .

По формуле (4) выполнены расчеты максимального потенциала «ИЗ – земля». Результаты расчетов представлены на рис. 2. При расчетах принималось: на каждой тяговой подстанции установлен один силовой трансформатор мощностью 40 МВА, участок двухпутный, пост секционирования включен и расположен в середине участка, контактная подвеска типа ПБСМ95+МФ100, рельсы Р65.

Анализ результатов расчета распределения напряжений «Искусственный заземлитель – земля» в зависимости от мощности системы внешнего электропитания и при широком изменении значений переходного сопротивления «Рельсы – земля» (от 0,5 до 15 Ом·км) показал, что максимальный потенциал «ИЗ – земля» при нарушении изоляции контактной сети колеблется в пределах от 1,6 до 2,4 кВ (рис. 2).

Полученные напряжения превышают допустимые по условиям обеспечения условий электробезопасности пассажиров, касающихся металлических ограждений. Установлено, что при уменьшении расстояния между тяговыми подстанциями (до 36 км) и при значениях переходного сопротивления больше 8 Ом·км зона максимальных потенциалов «ИЗ – земля» наблюдается на заземлениях, расположенных в середине участка.

На рис. 2 штриховыми линиями показаны результаты расчетов по распределению потенциалов «ИЗ – земля» при мощности короткого замыкания питающей системы на стороне 110 кВ, не превышающей 7500 МВА. В этом случае максимальный потенциал «ИЗ – земля» возникает, как правило, при расположении посадочных платформ, находящихся у поста секционирования. Величина этих потенциалов в 2–2,5 раза меньше, чем при бесконечно большой мощности системы внешнего энергоснабжения.

Отметим, что при количестве второстепенных путей в местах расположения посадочных платформ более двух напряжения металлических ограждений посадочных платформ относительно земли снижаются в среднем более чем в два раза и не превышают 0,8 кВ.

Установлено, что при отключении аварийного режима за время более 0,15 с реальное напряжение на теле человека становится выше допустимых значений по появлению фибрилляции сердца.

Обоснование системы заземления металлических ограждений посадочных платформ на электрифицированных участках переменного тока основывается на знании электрических параметров системы тягового электроснабжения и возможности отказа их соединения с рельсовым путем, а также исключения секционирования протяженными металлическими ограждениями рельсового пути.

В основу предлагаемой системы заземления металлических ограждений посадочных платформ положены следующие принципы:

- создание эквипотенциальных зон в местах нахождения персонала;
- использование экранирующего эффекта металлических полос, позволяющих снизить до допустимых пределов наведенные в металлических ограждениях посадочных платформ напряжения, обусловленные магнитным влиянием токов в тяговой сети;

- применение с целью снижения наведенных напряжений естественных заземлителей, в частности фундаментов опор, на которых расположены осветительные посадочных платформ, устройства видеонаблюдения и прочие устройства.

### Проект по заземлению металлических ограждений посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей

В системе тягового электроснабжения переменного тока разрешается применение защиты от токов короткого замыкания, требующей заземления на рельсовый путь металлических ограждений посадочных платформ и других металлических конструкций.

**Первый вариант** заземления металлических ограждений посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей.

1. Сооружения и конструкции посадочных платформ на участках переменного тока, а также металлические конструкции опор контактной сети, воздушных линий электропередачи и другие металлические конструкции, в частности крыши платформ, объединяются тросом группового заземления (ТГЗ). Длина одной секции ТГЗ не превышает 400 м. Каждая секция ТГЗ в середине наглухо подключается к искусственному заземлителю посредством заземляющих спусков и болтовых соединений.

2. Искусственный заземлитель располагается в земле на расстоянии не более 1 м от фундаментов поддерживающих платформу опор, на глубине 0,5–0,7 м и состоит из двух параллельно включенных металлических полос, каждая сечением 4 × 50 мм. Допускается вместо металлических полос использовать два металлических прутка (арматуру) диаметром более 18 мм. Металлические полосы через каждые 20 м соединяются друг с другом сваркой.

Длина искусственного заземлителя на 50 м превышает в одну и другую сторону протяженность посадочной платформы.

3. Искусственный заземлитель посадочной платформы наглухо соединяется со средней точкой путевого дроссель-трансформатора, устанавливаемого для выравнивания токораспределения по рельсовым нитям. Путьевой дроссель-трансформатор устанавливается в рельсовой сети примерно в середине

расположения посадочной платформы.

4. Для получения эффекта создания эквипотенциальных условий в месте нахождения пассажиров на посадочных платформах необходимо искусственный заземлитель в двух и более местах соединить сваркой с арматурой железобетонных плит посадочных платформ, объединенных в единую металлическую конструкцию.

На вновь сооружаемых высокоскоростных либо грузонапряженных линиях, а также при реконструкции посадочных платформ необходимо на поверхности железобетонных плит расположить металлическую сетку, обычно используемую для стяжки бетона.

Металлическая сетка с ячейками стороной не более 1,5 м в двух и более местах сваркой подключается к искусственному заземлителю.

При использовании как арматуры железобетонных плит, объединенной в единую металлическую конструкцию, так и металлической сетки соединение искусственного заземлителя с рельсовым путем не обязательно.

5. При невозможности расположения на платформе металлической сетки, а также подключения троса группового заземления к арматуре железобетонных плит посадочных платформ допускается подключение искусственного заземлителя к двум металлическим полосам, расположенным под железобетонными плитами и прикрепленным снизу к плитам. Одна из полос располагается на расстоянии 0,3 м от края платформы, вторая – на расстоянии 0,7 м от края. Металлические полосы через 50 м соединяются сваркой между собой.

**Второй вариант** заземления металлических ограждений посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей.

1. Допускается в качестве искусственного заземлителя, выполненного в виде двух расположенных в земле металлических полос, использовать искусственные сосредоточенные заземлители с сопротивлением растеканию каждого не более 10 Ом.

2. Сооружения и конструкции посадочных платформ на участках переменного тока, а также металлические конструкции опор контактной сети, воздушных линий электропередачи и другие металлические конструкции, в частности крыши платформ, объединяются тросом группового заземления.

Протяженность троса группового заземления не нормируется.

Трос группового заземления по длине через каждые 400 м подключается к искусственному сосредоточенному заземлителю с сопротивлением растеканию не более 10 Ом.

3. Трос группового заземления посадочной платформы наглухо соединяется со средней точкой путевого дроссель-трансформатора, устанавливаемого для выравнивания токораспределения по рельсовым нитям. Путевой дроссель-трансформатор устанавливается в рельсовой сети примерно в середине расположения посадочной платформы.

4. При невозможности расположения на платформе металлической сетки, а также подключения троса группового заземления к арматуре железобетонных плит посадочных платформ допускается подключение ТГЗ к двум металлическим полосам, расположенным под железобетонными плитами и прикрепленным снизу к плитам. Одна из полос располагается на расстоянии 0,3 м от края платформы, вторая – на расстоянии 0,7 м от края. Металлические полосы через 50 м сваркой соединяются между собой.

### **Выводы**

1. Предложена методика расчета магнитного и гальванического влияний тяговых сетей на металлические сооружения, учитывающая распределенные по длине первичные параметры системы заземления металлических ограждений посадочных платформ железнодорожных путей.

2. Разработана методика оценки условий электробезопасности при прикосновении человека к металлическим ограждениям, учитывающая случайный характер прикосновения пассажиров при их нахождении на платформах.

3. Обоснованы технические решения по заземлению металлических ограждений посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей. Показано, что наиболее перспективным решением по заземлению металлических ограждений посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей является использование искусственного заземлителя, расположенного в земле.

### **Литература**

1. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. – М.: Транспорт, 1997. – 68 с.
2. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. – М.: ИНТЕКСТ, 2008. – 480 с.
3. Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. – М.: ООО ВМГ-Принт, 2015. – 348 с.
4. Михайлов М.И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия. – М.: Связьиздат, 1959. – 583 с.
5. Шимони К. Теоретические основы электротехники. – М.: Мир, 1964. – 662 с.
6. Косарев Б.И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока. – М.: Транспорт, 1989. – 227 с.
7. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1964. – 772 с.
8. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

### **Косарев Борис Иванович**

Родился в 1940 году. В 1962 году окончил МИИТ по специальности «Теплоэнергетические установки электростанций». Доктор технических наук, профессор. В 1979 году защитил диссертацию по теме «Электрификация

железных дорог». В настоящее время работает профессором кафедры «Электроэнергетика транспорта» Российского университета транспорта (МИИТ). Автор более 300 научных трудов, имеет свыше 125 авторских свидетельств и патентов. Заслуженный деятель науки России.

### **Косарев Иван Александрович**

Родился в 1989 году. В 2013 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Менеджер организации». Кандидат технических наук. В 2016 году защитил диссертацию по теме «Многофакторная оценка условий электробезопасности при выполнении путевых работ на электрифицированных железных дорогах». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает заместителем начальника ПКБ АО «ВНИИЖТ». Имеет 7 научных трудов, 2 патента.

### **Kosarev Boris**

Was born in 1940. In 1962 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a degree in «Heat and power machines of electrical power plants». In 1979 he defended the thesis on the topic «Railways electrification». At the present time he works as a professor of «Electric power of transport» department of Russian University of Transport (MIIT). He is the author of 300 publications, more than 125 copyright certificates and patents. He is an honored academic figure of Russia.

### **Kosarev Ivan**

He was born in 1989. In 2013 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering majoring in «Organization manager». He is Candidate of Technical Sciences. In 2016 he defended the dissertation with topic «Multifactor evaluation of electrical safety conditions during engineering work on electrified railways». He has 8 years of work experience. At present he works as Deputy Director of Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC «VNIIZhT»). He has 7 scientific works, 2 patents.

# О методологии многофакторного эксперимента в задачах исследования электротехнических устройств железнодорожного транспорта

// On the methodology for multi-factor experiment in research problems of electrical devices of railway transport //

**Лисенков А.Н., д. т. н., профессор,  
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва**

**Косарев А.Б., д. т. н., профессор,  
АО «ВНИИЖТ», Москва**

*В статье рассмотрены подходы к исследованию электротехнических устройств железнодорожного транспорта с использованием методов многофакторного эксперимента, позволяющих получать наиболее полную информацию о зависимости рабочих характеристик и показателей качества от определяющих их факторов, выявить наилучшие варианты проектирования таких устройств, обеспечивающих необходимое качество функционирования в процессе эксплуатации. Предложены новая методика анализа результатов планов  $2^k$  при отсутствии повторных измерений выходных показателей (включая вычислительные эксперименты на основе теоретической модели объекта), а также удобные для практического использования планы второго порядка типа неполного факторного эксперимента  $3^k$ . Разработаны новые типы экономных ортогональных и квазиортогональных планов для решения типовых задач экспериментальных исследований, включая задачи робастного проектирования для получения изделий, рабочие характеристики и показатели качества которых устойчивы (робастны) к действию дестабилизирующих факторов. В качестве примера робастного проектирования электротехнических изделий на основе теоретической модели рассмотрена задача проектирования силового многофункционального вольтодобавочного трансформатора для повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока – снижения величины потерь электроэнергии в тяговой сети.*

*Ключевые слова:* система тягового электроснабжения, силовой вольтодобавочный трансформатор, экономные многофакторные планы, аппроксимационные модели, робастное проектирование.

*The article considers approaches to the study of electrical devices of railway transport with the use of multivariate methods for the experiment, allowing to obtain the most complete information about the dependence of performance and quality indicators from its determinants, to identify the best options for the design of such devices, providing the necessary quality of functioning in the process of operation. Proposed a new method of analysis of plans  $2^k$  in the absence of repeated measurements of the output parameters (including computational experiments based on the theoretical model of the object), and also convenient for the practical use of the plans of the second order partial factorial experiment  $3^k$ . Developed new types of orthogonal and quasi-orthogonal economical plans for solutions to common problems of experimental studies, including the robust design for manufacturing, performance and quality which is resistant (robust) to the action of destabilizing factors. As an example robust design of electrical products on the basis of the theoretical model we consider the problem of designing multifunctional power booster transformer to increase the efficiency of the traction power system of the AC – reduction of electricity losses in the traction network.*

*Keywords:* traction power supply system, power booster transformer, approximation models, multifactor plans, economical saturated plans, plan matrix, robust design.

Математическое планирование многофакторных экспериментов (МФЭ) – новый кибернетический подход к организации и проведению экспериментальных исследований современных сложных объектов и технологий. Использование методологии планирования МФЭ позволяет в значительной степени формализовать процесс исследования сложных объектов, сократить число опытов и время их проведения, получить наиболее полную информацию из эксперимента в виде математических моделей, пригодных для количественной оценки влияния факторов, нахождения оптимальных режимов проектирования и управления указанными объектами [1, 2, 3].

Применение методов МФЭ целесообразно для выявления основных факторов, определяющих значения показателей качества электрической энергии и ее расхода на электрифицированных железных дорогах, для изучения чувствительности указанных показателей и построения аппроксимационных моделей, пригодных для синтеза алгоритмов управления в автоматизированной системе контроля и управления электроресурсами (АСКУЭ) [4], а также для проектирования и испытаний электротехнических изделий с целью обеспечения их качества.

Формализация такого рода задач предусматривает выбор основных показателей, характеризующих расход и потери электроэнергии, включая расход электроэнергии на тягу поездов, напряжение на токоприемнике электровозов, потерю электроэнергии и т. д. Основными факторами, влияющими на значения указанных показателей, являются [4, 5]:

- расстояние между тяговыми подстанциями;
- величина межпоездного интервала;
- наличие компенсирующих устройств;
- тип тягового электроснабжения (25 кВ; ЭУП 2 x 25 кВ);

Таблица 1. Матрица плана 2<sup>3</sup>

<i>u</i>	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	Обозначения строк *
1	+	-	-	-	+	+	+	-	(1)
2	+	+	-	-	-	-	+	+	$x_1$
3	+	-	+	-	-	+	-	+	$x_2$
4	+	+	+	-	+	-	-	-	$x_1x_2$
5	+	-	-	+	+	-	-	+	$x_3$
6	+	+	-	+	-	+	-	-	$x_1x_3$
7	+	-	+	+	-	-	+	-	$x_2x_3$
8	+	+	+	+	+	+	+	+	$x_1x_2x_3$

\* В такой компактной форме запись (1) означает, что все факторы находятся на уровнях минус 1,  $x_1$  – соответствует опыту, в котором на уровне плюс 1 только этот фактор и т. д.

- грузонапряженность электрифицированного участка;
- нелинейность вебер-амперной характеристики рельсовой и трансформаторной стали;
- переходное сопротивление «Рельсы – земля», а также наличие других факторов, оказывающих дестабилизирующее влияние на указанные показатели качества.

В данной работе рассматриваются возможности известных и предлагаемых методов МФЭ для исследования электротехнических устройств железнодорожного транспорта как объектов управления при решении следующих типовых задач:

- изучение чувствительности объектов и реализация процедур отсеивающего эксперимента для выделения наиболее существенных факторов с использованием многофакторных планов 2<sup>k</sup>;
- построение аппроксимационных моделей объектов по данным реальных экспериментов и в многовариантных расчетах на основе их аналитических зависимостей с использованием планов второго порядка и многоуровневых факторных планов;
- робастное проектирование и многофакторные испытания электротехнических изделий для обеспечения их качества.

**Планы 2<sup>k</sup> для анализа чувствительности объектов и задач отсеивающего эксперимента для выделения существенных факторов**

Планы 2<sup>k</sup>, в которых каждый из *k* варьируют только на двух уровнях и реализуют  $N = 2^k$  опытов или часть этого числа, наиболее распространены на практике [1, 2, 3]. Их применяют на первом этапе исследования многофакторных объектов для изучения чувствительности выходных показателей к изменению указанных факторов с целью количественной оценки их влияния. Пусть выбраны исследуемые факторы  $x_i, i = \overline{1, k}$  и определены их кодированные значения  $x_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}$ , где  $x_i$  – значение фактора в его физических единицах;  $x_{i0}$  – его значение в центре плана;  $\Delta x_i$  – шаг варьирования по фактору. Получаемые безразмерные кодированные факторы  $x_i$  принимают только два значения: -1 и 1. Это значительно сокращает запись условий

эксперимента и упрощает его последующий анализ. Матрица плана такого эксперимента для  $k = 3$  факторов из  $N = 2^3 = 8$  опытов представлена в таблице 1.

Здесь условия  $N = 8$  опытов представлены комбинациями уровней трех факторов, обозначенных – и +, то есть единица в них для простоты опущена. В столбце первого фактора  $x_1$  уровни меняются с максимальной частотой от опыта к опыту, в столбце  $x_2$  – в 2 раза реже, в столбце  $x_3$  – в 2 раза реже предыдущего столбца. Реализация такого эксперимента позволяет получить модель типа многомерного полинома, включающего коэффициенты  $b_i$  всех трех факторов, их взаимного влияния  $b_{ij}$ , а также эффект тройного взаимодействия факторов  $b_{ijk}$ :

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

Такая модель представляет собой разложение исследуемой неизвестной зависимости  $y = f(x_1, \dots, x_k)$  в многомерный ряд Тейлора в окрестности исходного режима.

Для оценки всех коэффициентов подобной модели, в данном случае для  $k = 3$ , расчетная матрица плана (РМП) содержит соответствующие столбцы, получаемые произведением первых  $k = 3$  столбцов плана, а также фиктивный столбец  $x_0$  для оценки свободного члена модели  $b_0$ . Легко убедиться, что для столбцов этой РМП выполняются следующие свойства симметрии, нормирования и попарной ортогональности:

$$\sum_{n=1}^N x_{iu} = 0; \sum_{n=1}^N x_{iu}^2 = N; \sum_{n=1}^N x_{iu}x_{ju} = 0.$$

Благодаря этим свойствам расчет коэффициентов моделей, их анализ и интерпретация существенно упрощаются.

Все коэффициенты модели определяются методом наименьших квадратов,

независимо друг от друга, с одинаковыми минимальными дисперсиями (с максимальной точностью):

$$b_q = \frac{\sum_{n=1}^N y_n x_{qu}}{N}; S^2\{b_q\} = \frac{S_y^2}{N}; q = \overline{1, N-1}.$$

Дисперсию воспроизводимости значений выходного показателя подсчитывают по результатам повторных опытов в одном из вариантов факторного плана (обычно в его центральной точке, соответствующей исходному режиму  $x_{i0}, i = \overline{1, k}$ ):

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{i0} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}$$

с числом степеней свободы  $f_0 = n_0 - 1$  или же по повторным опытам в *N* вариантах плана.

Значимость полученных коэффициентов модели проверяется по *t*-критерию Стьюдента. Если расчетное значение критерия  $t = \frac{\{b\}}{s\{b\}}$  будет меньше соответствующего критического значения  $t_\alpha(f)$  для уровня значимости  $\alpha$  (обычно  $\alpha = 0,05$ ) и числа степеней свободы *f*, с которым была определена дисперсия воспроизводимости, то коэффициент незначимо отличается от нуля и исключается из уравнения. В противном случае коэффициент считается значимым и сохраняется в модели.

Заключительный этап анализа предусматривает проверку адекватности полученной модели, включающей только значимые коэффициенты, с помощью *F*-критерия Фишера. С этой целью вычисляют дисперсию неадекватности

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2}{N - L} c f_{ад} = N - L.$$

Здесь  $y_u$  и  $\hat{y}_u$  – полученные в эксперименте и предсказываемые по модели значения выходного показателя в опытах плана; *N* – общее число опытов плана; *L* – число значимых коэффициентов.

Если расчетное значение критерия Фишера меньше соответствующего табличного значения  $F_{\alpha}(f_{ad}, f_y)$ , то модель адекватно описывает результаты эксперимента и может быть использована для интерпретации влияния факторов, а также направленной оптимизации объекта. Если модель оказалась неадекватной, осуществляют переход к планам и моделям второго порядка.

Планы полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа  $2^k$  и модели со всеми взаимодействиями факторов используют для исследования объектов, где наибольший интерес представляют указанные взаимодействия – новая информация, которую не дает традиционный однофакторный эксперимент. В задачах оптимизации используют планы дробного факторного эксперимента (ДФЭ), включающие только часть опытов ПФЭ типа  $2^k$  для получения моделей, содержащих только эффекты влияния самих факторов и, возможно, некоторых их взаимодействий. Например, в рассмотренном плане  $2^3$  из  $N = 8$  опытов кроме трех факторов можно исследовать еще четыре фактора (всего семь факторов), варьируя их согласно столбцам взаимодействий из таблицы 1. Получаемая при этом модель будет содержать эффекты влияния семи факторов, которые будут смешаны с возможными взаимодействиями в реально исследуемой системе (такими взаимодействиями можно пренебречь при выборе шагов варьирования для факторов как достаточно малыми, при этом члены высшего порядка в разложении ряда Тейлора оказываются незначимыми).

### Методы отсеивающего эксперимента на основе планов $2^k$

Они применяются на первых этапах исследования с целью выделить из большого числа факторов наиболее существенные, потенциально влияющие на итоговые показатели. Для этого используют экономные насыщенные планы (планы, в которых число опытов равно числу оцениваемых эффектов), а также сверхнасыщенные планы случайного баланса, в которых число опытов  $N$  меньше числа исследуемых эффектов (но больше числа  $l$  выделяемых значимых эффектов). В качестве насыщенных обычно используют планы ДФЭ  $2^k$ , представляющие определенные части планов ПФЭ. Эти планы ДФЭ существуют

для числа факторов  $k = 3, 7, 15, 31, 33$  с числом опытов  $N = 4, 8, 16, 32, 64$ . Для промежуточных значений с числом опытов, кратным четырем, то есть  $N = 4n$ , используют планы Плакетта – Бермана [2, 3]. Для других значений возможно использовать ортогональные и квази-ортогональные планы  $2^k$ , каталоги которых получены и имеются в [1, 2]. Когда исследуемых факторов много, а пропуск одного из них может привести к неправоначальному определению влияния других, насыщенные планы требуют большого числа опытов. В этом случае можно включить в исследование все факторы и сократить число опытов, используя случайные выборки строк ПФЭ  $2^k$ , при этом смешивание эффектов факторов будет произвольным.

Когда существенных эффектов предполагается немного, можно ожидать, что при таком случайном смешивании вероятность выделения доминирующих эффектов будет достаточно велика.

Другим важным предположением, лежащим в основе применения метода случайного баланса, является то, что факторы неравнозначно влияют на отклик, то есть их можно проранжировать в порядке убывания, и при этом большинство из них может быть отнесено к шумовому фону.

Матрица плана случайного баланса может быть получена путем отбора строк факторного эксперимента с помощью таблиц случайных чисел или же случайным смешиванием дробных реплик [1, 3]. Можно также воспользоваться готовыми (систематически отобранными) планами случайного баланса со слабо коррелированными столбцами, которые получены с помощью ЭВМ.

Анализ результатов эксперимента по плану случайного баланса можно проводить на ЭВМ, используя так называемый алгоритм ветвящейся стратегии, с помощью метода регрессионного анализа, позволяющего одновременно оценивать до 40 эффектов. Процедура имеет итеративный характер и проводится до тех пор, пока не будет найден наилучший вариант с минимальной остаточной дисперсией и незначимым значением  $F$ -критерия [3].

В практических задачах при планировании как реальных, так и вычислительных экспериментов на основе теоретических моделей, в случае жестких ограничений на стоимость опытов возможен анализ планов  $2^k$  по их

результатам без повторных измерений согласно методике, рассмотренной в [6]. При этом контрасты  $L_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  плана  $2^k$  трактуются как независимые реализации случайных переменных с распределением  $N(L_i, \sigma_i^2)$ , то есть выборочные распределения эффектов  $L_i$  примерно нормальны с возможно различными средними  $L_i$ , но равными дисперсиями  $\sigma_i^2$ . Вычислив контрасты  $L_i$ , можно определить их ошибку как  $So = 1,5 \text{mid}|L_i|$  и псевдостандартную ошибку  $\tilde{So} = 1,5 \text{med}|L_i|$ , являющиеся хорошей оценкой  $\sigma_i$ , когда значимые контрасты редки  $L_i < 2,5So$ . Причем в имитационных экспериментах методом Монте – Карло показано, что число степеней свободы такой ошибки  $f \approx m/3$ . Значение интервальной 95-процентной оценки контраста  $L_i \pm \Delta L$ , где  $\Delta L = t_{0,975}(f) \cdot \tilde{So}$ ,  $a$ -граничная ошибка множественных сравнений контраста  $\Delta \tilde{L} = t_{\gamma}(f) \cdot \tilde{So}$ , где  $\gamma = (1 + 0,95^{1/m})/2$ . Используя значения  $t_{0,975}(f)$  и  $t_{\gamma}(f)$  для  $f = m/3$ , вычисляют  $\Delta L$  и  $\Delta \tilde{L}$ . Далее делают заключение о незначимости эффекта, если  $|\tilde{L}_i| < |\Delta L| < |\Delta \tilde{L}|$ ; возможной его значимости, если  $|\Delta L| < |\tilde{L}_i| < |\Delta \tilde{L}|$ ; значимости с высокой вероятностью, если  $|\tilde{L}_i| > |\Delta \tilde{L}|$ .

### Построение аппроксимационных моделей с помощью планов второго порядка и многоуровневых факторных планов

В случае неадекватности модели, полученной по плану  $2^k$ , переходят к построению модели в виде полинома второго порядка

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2.$$

Чтобы оценить все  $l = \frac{(k+1)(k+2)}{2}$  значений коэффициентов квадратической модели, надо иметь план, в котором каждая переменная варьируется хотя бы на трех разных уровнях. Сам план должен быть таким, чтобы его информационная матрица  $C = (X^T X)$  была невырожденной, то есть чтобы существовала обратная матрица  $V = (X^T X)^{-1}$ .

Кроме того, план должен соответствовать определенному критерию оптимальности, то есть модель должна обладать желаемыми статистическими свойствами.

Наиболее часто на практике используют последовательно строящиеся или композиционные планы. Их получают путем добавления  $2^k$  звездных точек типа  $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm\alpha)$

и некоторого числа нулевых точек  $N_0$  к ядру, образованному ПФЭ илиДФЭ типа  $2^k$ .

Таким образом, общее число точек в композиционном плане

$$N = N_1 + 2^k + N_0,$$

где  $N = \begin{cases} 2^k & \text{при } k > 5 \\ 2^{k-1} & \text{при } k \geq 5 \end{cases}$ .

Матрица такого плана для  $k = 3$  факторов с общим числом опытов  $N = 15$  представлена в таблице 2.

Таблица 2. Матрица композиционного плана ОЦКП для  $k = 3$

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	1	-1	-1	+1
2	1	+1	-1	-1
3	1	-1	+1	-1
4	1	+1	+1	+1
5	1	-1	-1	-1
6	1	+1	-1	+1
7	1	-1	+1	+1
8	1	+1	+1	-1
9	1	- $\alpha$	0	0
10	1	+ $\alpha$	0	0
11	1	0	- $\alpha$	0
12	1	0	+ $\alpha$	0
13	1	0	0	-
14	1	0	0	- $\alpha$
15	1	0	0	0

В таких ортогональных центральных композиционных планах (ОЦКП) величина звездного плеча  $\alpha$  выбирается такой, чтобы обеспечить независимую оценку коэффициентов квадратической модели, как и в моделях  $2^k$ . В ротативных центральных композиционных планах (РЦКП), имеющих аналогичную с ОЦКП структуру, величину  $\alpha$  и число точек в центре плана выбирают таким образом, чтобы получить модель, обеспечивающую одинаковую точность прогноза выходного показателя  $y$  в точках области режимов, равноотстоящих от центра эксперимента [1, 3, 6].

Важным в практическом отношении является класс планов второго порядка типа неполного факторного эксперимента (НФЭ)  $3^k$ , в которых каждая переменная варьируется всего на трех уровнях (-1, 0, +1). Эти планы представляют собой определенные выборки строк из ПФЭ  $3^k$ . Структура их такова, что во всех строках плана отличны от нуля значения только двух (для  $k = 3-5$ ) или трех

(для  $k = 6,7$ ) элементов. Так как любое варьирование факторами (смена уровней) в процессе экспериментирования связано с определенными затратами, использование таких планов удешевляет проведение экспериментов, снижает затраты на переналадку режимов, а также проведение анализа результатов эксперимента [1, 2].

Кроме планов второго порядка, для построения полиномиальных аппроксимаций моделей объектов в более широкой области режимов используют многоуровневые факторные планы, включая экономные ортогональные и квазиортогональные планы, позволяющие минимизировать перебор вариантов сочетаний уровней факторов и получить модели главных эффектов факторов, не содержащих их взаимодействий [1, 2].

Полная полиномиальная модель многоуровневого плана  $p_1 \times p_2 \times \dots \times p_k$  имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{q=1}^{p_1-1} b_1^{(q)} 0_1^{(q)}(x_1) + \dots + \sum_{q=1}^{p_k-1} b_k^{(q)} 0_k^{(q)}(x_k) + \Pi + \varepsilon,$$

где  $0_i^{(q)}(x_i)$  – ортогональные полиномы  $q$ -й степени для  $i$ -й переменной с  $p_i = q_i + 1$  уровнями, с помощью которых оцениваются главные эффекты факторов (линейные, квадратические и другие эффекты);  $\Pi$  соответствует взаимодействиям главных эффектов. Обычно для каждого фактора функции  $0_i^{(q)}(x_i)$  могут быть заданы системой ортогональных полиномов Чебышева, определенных в точках  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}$ . В случае полного факторного эксперимента член  $\Pi$  содержит все возможные произведения функций  $0_i^{(q)}(x_i)$ . Для планов главных эффектов член  $\Pi$  отсутствует, а для плана с взаимодействиями факторов он содержит парные произведения функций  $0_i^{(q)}(x_i)$  и  $0_j^{(q)}(x_j)$ .

В силу попарной ортогональности столбцов матрицы коэффициентов

регулярного плана  $\theta$  параметры модели, как и в случае планов  $2^k$ , оцениваются по методу наименьших квадратов независимо.

Методы построения и каталоги наиболее практичных многоуровневых ортогональных, а также новых типов построенных нами квазиортогональных планов, дающих дополнительное снижение числа опытов на 20...25% по сравнению с ближайшими ортогональными, описаны в [1, 2].

Рассмотренный подход для построения аппроксимационной модели в базе полиномов Чебышева был использован авторами данной статьи при анализе значений напряжений в системе «Рельсы – земля» (таблица 3). Этот показатель рассматривался как функция переходного сопротивления системы «Рельсы – земля» на четырех уровнях и расстояния от тяговой подстанции до места короткого замыкания на шести уровнях [6]. При использовании полиномов Чебышева было выявлено, что аппроксимация зависимости для каждого из четырех значений переходного сопротивления может быть представлена полиномом не выше 2-го порядка в интервале  $l = 3 \dots 15$  км или, возможно, полиномом 3-го порядка в интервале  $l = 1 \dots 15$  км.

Отметим, что целесообразность применения регрессионных моделей для описания зависимости выходных параметров от определяющих их входных факторов при управлении режимами электроэнергетических систем отмечалась еще в типовой инструкции Минэнерго СССР по оптимальному управлению напряжением и мощностью в сетях энергосистем [7]. Рассмотренная методология планирования и анализа МФЭ для построения таких моделей обеспечивает необходимое качество и точность. Очевидна необходимость создания банка таких моделей для типовых объектов энергопотребления на электрифицированных железных дорогах

Таблица 3. Распределение напряжений по длине рельсового пути в протяженном тоннеле

Переходное сопротивление, Ом-км, по уровням	Распределение напряжений по длине рельсового пути в зависимости от расстояния до места короткого замыкания, км					
	1	3	6	9	12	15,6
1	600	620	600	530	570	580
2	710	740	700	640	680	700
3	830	850	790	720	760	800
4	1030	1040	970	950	990	1020

с целью их использования в задачах прогнозирования и управления потреблением электроэнергии, реализуемых в АСКУЭ.

### Робастное проектирование и многофакторные испытания электротехнических устройств для обеспечения их качества

Робастное проектирование предназначено для получения изделий, рабочие характеристики и показатели качества которых устойчивы (робастны) к действию дестабилизирующих факторов, возникающих после проектирования на этапах производства, хранения и эксплуатации продукции. Оно основано на использовании экономных планов МФЭ неполного перебора вариантов [2, 10]. Основные положения такого подхода и возможностей его использования для проектирования вольтодобавочного трансформатора изложены в [11]. Здесь же ограничимся иллюстрацией методики робастного проектирования в задаче обеспечения качества – стабильности значений тока необходимого номинала  $I$  в проектируемом электронном контуре, содержащем активное сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$ . В реальных условиях его эксплуатации из-за возможного наличия дестабилизирующих факторов (колебаний напряжения  $V$ , частоты тока  $f$ , а также температуры и влажности воздуха, влияющих на  $R$  и  $L$ ), значения тока

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}}$$

будут меняться.

Методика робастного проектирования при наличии подобной аналитической зависимости предполагает проведение многовариантных расчетов значений тока при различных значениях основных факторов  $R$  и  $L$ , например, на трех разных уровнях каждый, в интересующем диапазоне по плану  $3^{2//9}$  из  $N = 9$  вариантов, и имитацию влияния упомянутых четырех дестабилизирующих факторов, каждый на двух уровнях в интересующем диапазоне по плану  $2^{4//16}$  из  $n = 16$  вариантов. Итоговый план робастного проектирования, в котором каждый вариант основного плана испытывается в каждом варианте плана дестабилизирующих факторов, будет содержать всего  $N \times n = 144$  результата. Для каждого из полученных  $N$  вариантов основного плана вычисляют среднее значение тока  $\bar{y}_i$ , его дисперсию  $s_i^2$

и значение  $T$ -критерия, в данном случае критерия

$$T = 10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right).$$

Далее анализируют графическую зависимость  $T$ -критерия от уровней каждого из основных факторов, фиксируя те их уровни, при которых наблюдается наибольшее значение критерия. Комбинация таких уровней и будет определять наилучший робастный вариант (значения  $R$  и  $L$ ), который обеспечит наибольшую стабильность значений тока, независимо от действия упомянутых дестабилизирующих факторов в определенном их диапазоне.

В задачах робастного проектирования, где с помощью МФЭ приходится проводить не многовариантные расчеты, а создавать и испытывать прототипы проектируемых систем, из-за ограниченности ресурсов используют экономные планы неполного перебора вариантов [2, 10]. Например, в задаче проектирования электротеплообменника вместо плана  $3^{3//27}$  для трех основных факторов на трех уровнях каждый и плана  $2^{3//8}$  для трех дестабилизирующих факторов на двух уровнях каждый (всего  $N = 27 \times 8 = 216$  вариантов) использованы план неполного перебора вариантов  $3^{3-1//9}$  и план  $2^{3-1//4}$ , составляющие план робастного проектирования всего из  $N = 9 \times 4 = 36$  вариантов [10]. Существенно, что в задачах многофакторных испытаний в качестве дестабилизирующих факторов может быть использовано влияние порядка воздействий такими факторами.

Разработанные для таких задач каталоги экономных ортогональных и квазиортогональных планов, включая планы для изучения факторов с учетом порядка их воздействий, представлены в [1, 2].

### Выводы

1. Рассмотренные подходы и методология экспериментирования с использованием методов МФЭ имеют широкую перспективу в задачах исследования электротехнических устройств железнодорожного транспорта, способствуют повышению эффективности подобных исследований и обеспечению качества проектирования, производства и эксплуатации таких изделий.

2. Предложены новая методика анализа планов  $2^k$  при отсутствии повторных измерений их результатов, включая вычислительные эксперименты на

основе теоретической модели объекта, а также удобные для практического использования планы второго порядка типа неполного факторного эксперимента  $3^k$ .

3. Разработаны новые типы экономных ортогональных и квазиортогональных планов для решения типовых задач экспериментальных исследований, включая задачи робастного проектирования и многофакторных испытаний электротехнических устройств железнодорожного транспорта.

### Литература

1. Лисенков А.Н. Математические методы планирования многофакторных медико-биологических экспериментов. – М.: Медицина, 1979. – 343 с.
2. Маркова Е.В., Лисенков А.Н. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента. – М.: Наука, 1979. – 348 с.
3. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Физматгиз, 1971. – 207 с.
4. Косарев А.Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. – М.: Интекст, 2004. – 272 с.
5. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения транспорта. – М.: Интекст, 2008. – 480 с.
6. Лисенков А.Н. Планирование эксперимента и идентификация математических моделей в условиях неопределенности при изучении биотехнологических, медицинских и экологических систем / Материалы 1-й Международной конференции «Моделирование и управление биотехнологическими, экологическими и биомедицинскими системами». – Болгария (Варна), 1990. – С. 150–155.
7. Типовая инструкция по оптимальному управлению потоками реактивности мощности и уровнями напряжения в электрических сетях энергосистем. – М.: Издательство Минэнерго СССР, 1982. – 172 с.
8. Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. – М.: ООО ВМГ-Принт, 2015. – 348 с.
9. Леон Р. и др. Управление качеством, робастное проектирование, метод Тагути. Пер. с англ. – М.: Сейфи, 2002.
10. Лисенков А.Н. Робастное проектирование: использование ортогональных планов неполного перебора вариантов // Методы менеджмента качества, 2007, № 5, с. 18–22.
11. Лисенков А.Н. Робастное проектирование и многофакторные испытания электротехнических изделий транспорта для обеспечения

их качества // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 3. – С. 41–44.

**Лисенков Александр Николаевич**

Родился в 1940 году. В 1963 году окончил Московский энергетический институт по специальности «Инженер-электрик по автоматике и телемеханике». Доктор технических наук, профессор. В 2000 году защитил диссертацию по теме «Статистическая оптимизация и моделирование в задачах биотехнологии и медицины (вопросы теории и приложений методов многофакторного эксперимента)». Опыт работы – 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Менеджмент и управление персоналом организации» Российского университета транспорта (МИИТ). Имеет более 250 публикаций, в том числе 3 монографии.

**Косарев Александр Борисович**

Родился в 1964 году. В 1986 году окончил Московский государственный университет

путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение магистральных железных дорог». Доктор технических наук, профессор. В 1999 году защитил диссертацию по теме «Методы и средства обеспечения экологической безопасности в зонах электромагнитного влияния электрифицированных железных дорог переменного тока». В настоящее время работает заместителем генерального директора АО «ВНИИЖТ». Автор более 100 публикаций и 15 авторских свидетельств и патентов.

**Lisenkov Alexander**

Was born in 1940. In 1963 he graduated from Moscow Power Engineering University majoring in «Electrical engineer for automation and telemechanics». He is Candidate of Technical Sciences, professor. In 2000 he defended the thesis, the subject of dissertation is «Statistical optimization and modeling in the problems of biotechnology and medicine (questions of

theory and applications of methods of multi-factor experiment)». He has 50 years of work experience. At present he works as professor of «Personnel management and management of the organization» department of Russian University of Transport (MIIT). He has more than 250 publications, including 3 monographs.

**Kosarev Alexander**

Was born in 1964. In 1986 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with specialization in «Electrical supply of main railway lines». He is a Doctor of Engineering, professor. In 1999 he defended a thesis in the subject «Methods and means of environmental security in electromagnetic interference zones of AC electrified railroads». At present he works as deputy general manager of JSC «VNIIZhT». He has more than 100 publications, 15 author's certificates and patents.

# Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена

// An investigation into the possibilities of genetic algorithm application to solve the underground electric rolling stock scheduling problem //

Сидоренко В.Г., д. т. н., профессор,  
Чжо М.А.,  
РУТ (МИИТ), Москва

Работа является продолжением серии публикаций на тему применения генетических алгоритмов к решению задачи организации технического обслуживания электроподвижного состава метрополитена. Авторами выполнена адаптация алгоритмов кроссинговера, реализуемых в рамках генетического алгоритма, к особенностям решаемой задачи. Исследованы возможности применения для решения задачи построения ГА различных типов кроссинговера и влияние параметров генетического алгоритма на полученные результаты. Представлены результаты решения задачи с использованием генетического алгоритма.

Ключевые слова: электроподвижной состав, техническое обслуживание, генетический алгоритм, оптимизация, планирование.

This paper is a part of continuation publications on the topic of genetic algorithms application to the scheduling of underground rolling stock maintenance. The authors implemented the adaptive crossover selection algorithms within the genetic algorithm framework according to the features of the scheduling problem. Then the authors investigated the possibilities of genetic algorithm by using the different crossover types in solving rolling stock scheduling problem, and the influence of parameters in genetic algorithm on the results obtained. The results of genetic algorithm application are described.

Keywords: electric rolling stock, technical maintenance, genetic algorithm, optimization, scheduling.

В 2016 году в журнале «Электроника и электрооборудование транспорта» была опубликована статья, посвященная

различным подходам к организации технического обслуживания электроподвижного состава (ЭПС) метрополитена

как основы обеспечения безопасности сложных транспортных систем [1]. Настоящая публикация является продолжением указанной темы, в статье представлены результаты адаптации генетического алгоритма (ГА) к особенностям решаемой задачи.

Ключевыми моментами создания ГА являются [2]:

- описание хромосомы;
- описание фитнес-функции для каждой хромосомы в популяции;
- создание способа кроссинговера, учитывающего особенности задачи.

Вопросы описания хромосомы и фитнес-функции рассмотрены в [1, 3]. В данной статье акцентируется внимание на создании способов кроссинговера, учитывающих особенности задачи.

На рис. 1 представлена классификация алгоритмов кроссинговера [1]. На основе ранее известных алгоритмов кроссинговера формализованы и реализованы новые.

При одноточечном и двухточечном кроссинговерах появляются два потомка. При одноточечном кроссинговере случайным образом определяется



Рис. 1. Классификация алгоритмов кроссинговера



Рис. 2. Одноточечный кроссинговер



Рис. 3. Двухточечный кроссинговер

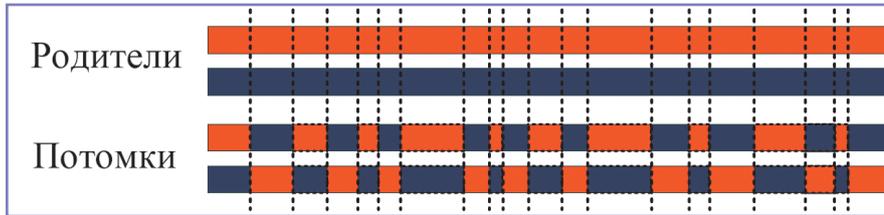


Рис. 4. Равномерный кроссинговер

локус, левее которого, включая указанный локус, хромосома одного потомка является копией хромосомы одного родителя, а правее – другого. У второго потомка наоборот (рис. 2) [3].

При двухточечном кроссинговере случайным образом определяются значения двух локусов. У первого потомка между выбранными локусами, включая их самих, хромосома является копией хромосомы первого родителя, а вне – второго. У второго потомка наоборот (рис. 3).

При рассеянном (равномерном) кроссинговере аллель гена потомка равна аллели гена одного из родителей, имеющего тот же локус. Выбор родителя осуществляется случайным образом (рис. 4).

При арифметическом и промежуточном кроссинговере аллель гена потомка определяется как средневзвешенное значение аллелей генов родителей, имеющих тот же локус, с учетом ограничений на область допустимых значений. Сумма весов аллелей родителя равна

единице, веса определяются пользователем алгоритма. Разница арифметического и промежуточного кроссинговеров заключается в различии диапазона изменения одного из весов.

При эвристическом кроссинговере хромосома потомка является концом вектора, полученного путем умножения исходного вектора на константу, большую единицы. Началом исходного вектора является хромосома родителя с худшим значением фитнес-функции, концом – хромосома родителя с лучшим значением фитнес-функции. Начала исходного и результирующего векторов совпадают. При изменении длины вектора учитываются ограничения на область допустимых значений.

Арифметический, эвристический и промежуточный кроссинговеры могут применяться как к номерам кандидата в множестве кандидатов, упорядоченном в лексикографическом порядке, так и отдельно к каждому компоненту

кортежа, а затем по полученным значениям определяется номер кандидата в множестве кандидатов. В первом случае реализуется работа с аллелью как со скаляром, а во втором – как с вектором.

Компоненты кортежа  $k = (p, t_b)$ , описывающего кандидата, имеют разную природу: время  $k: t_b$  и место  $k: p$  [4]. При арифметическом, эвристическом и промежуточном способах кроссинговера это необходимо учесть.

При первом (скалярном) способе кроссинговер применяется непосредственно к номерам кандидата в множестве кандидатов, упорядоченном в лексикографическом порядке, как показано на рис. 5 и 6. Значение аллели изменяется в пределах от единицы до количества кандидатов  $N_k$ .

Для арифметического и промежуточного кроссинговеров выражения, в соответствии с которыми выполняется вычисление, имеют вид

$$c = \alpha \cdot \text{parent1} + (1 - \alpha) \cdot \text{parent2}, \quad (1)$$

где  $\text{parent1}, \text{parent2}$  – значения аллелей родителей, причем

$$\text{score}(\text{parent1}) \leq \text{score}(\text{parent2}),$$

где  $\text{score}$  – значение фитнес-функции;

$c$  – результат вычисления значения аллели потомка без учета ограничения на диапазон изменения;

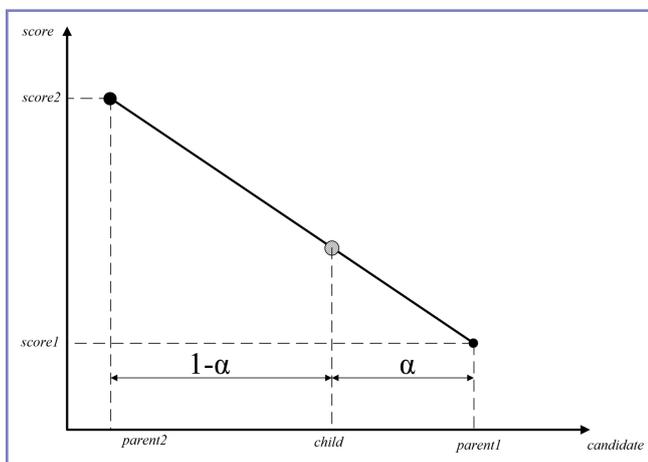


Рис. 5. Арифметический и промежуточный кроссинговеры в скалярном виде

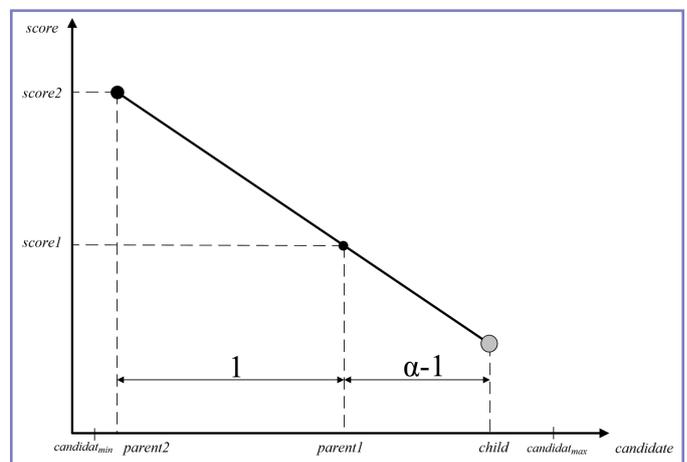


Рис. 6. Эвристический кроссинговер в скалярном виде

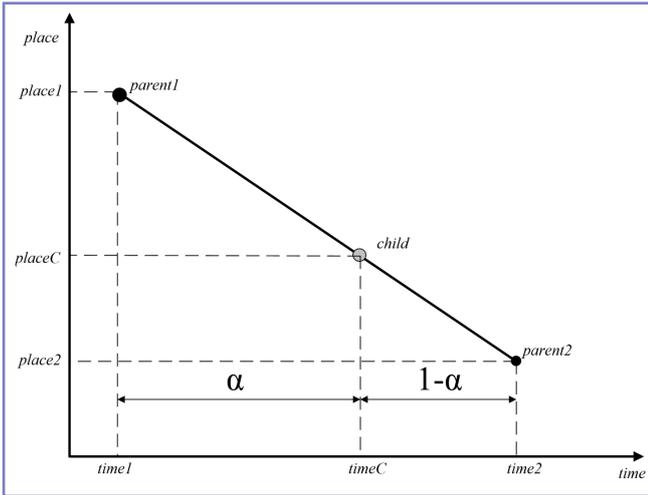


Рис. 7. Арифметический и промежуточный кроссинговеры в векторном виде

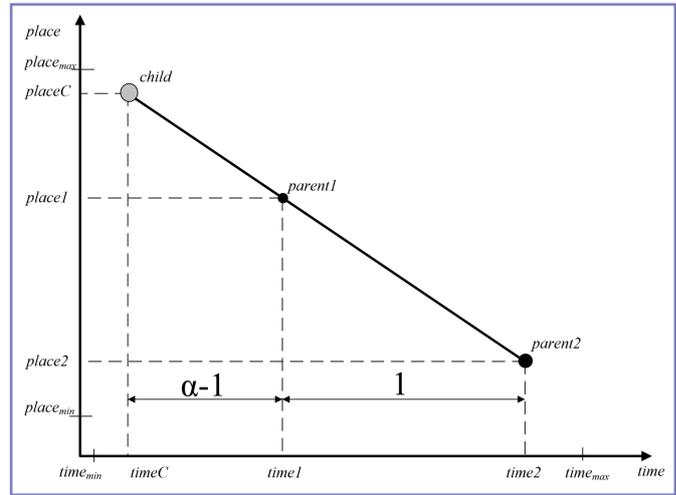


Рис. 8. Эвристический кроссинговер в векторном виде

$\alpha$  – весовой коэффициент:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha \leq 1 & \text{при арифметическом;} \\ \alpha \leq h < 1 & \text{при промежуточном;} \end{cases}$$

$h$  – максимальное значение весового коэффициента, заданное пользователем.

Для эвристического кроссинговера выражения, в соответствии с которыми выполняется вычисление, имеют вид

$$c = \text{parent2} + \alpha (\text{parent1} - \text{parent2}), \quad (2)$$

$\alpha > 1.$

Ограничение на диапазон изменения значения аллели потомка *child* реализуется следующим образом:

$$\text{child} = \begin{cases} c, & \text{если } 1 \leq c \leq N_k \\ 1, & \text{если } 1 > c \\ N_k, & \text{если } c > N_k \end{cases} \quad (3)$$

При втором (векторном) способе, как показано на рис. 7 и 8, действия применяются отдельно к каждому компоненту кортежа, а затем по полученным значениям определяется номер кандидата в упорядоченном множестве кандидатов, который определяет значение аллели.

К компоненте «Время  $k:t_b$ » применяется непосредственно используемый тип кроссинговера. Вычисления проводятся по формулам, аналогичным (1–3).

К компоненте «Место  $k:p$ » кроме арифметического, эвристического и промежуточного может применяться еще рассеянный (равномерный) тип кроссинговера.

На рис. 9–11 представлены результаты построения ГА для одной из линий Московского метрополитена с использованием разработанной системы

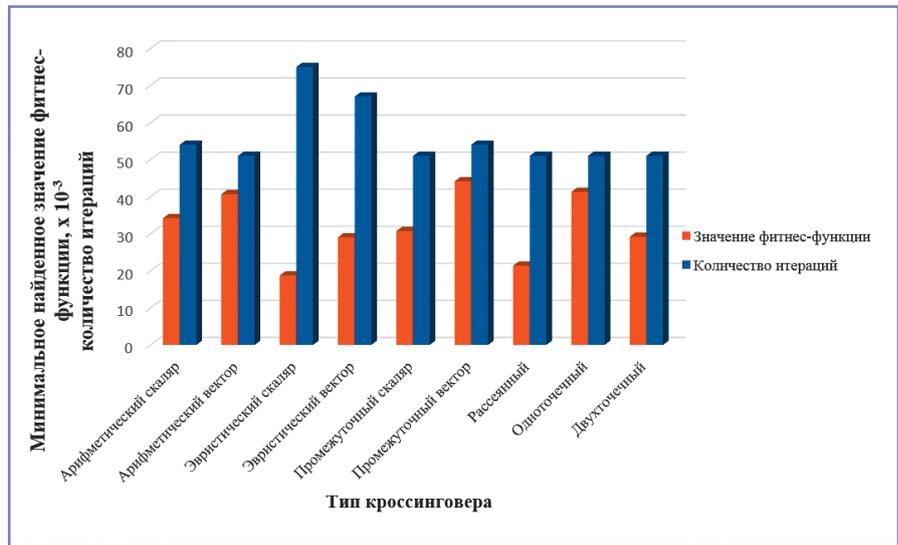


Рис. 9. Зависимость минимального найденного значения фитнес-функции и выполненного количества итераций от алгоритма кроссинговера

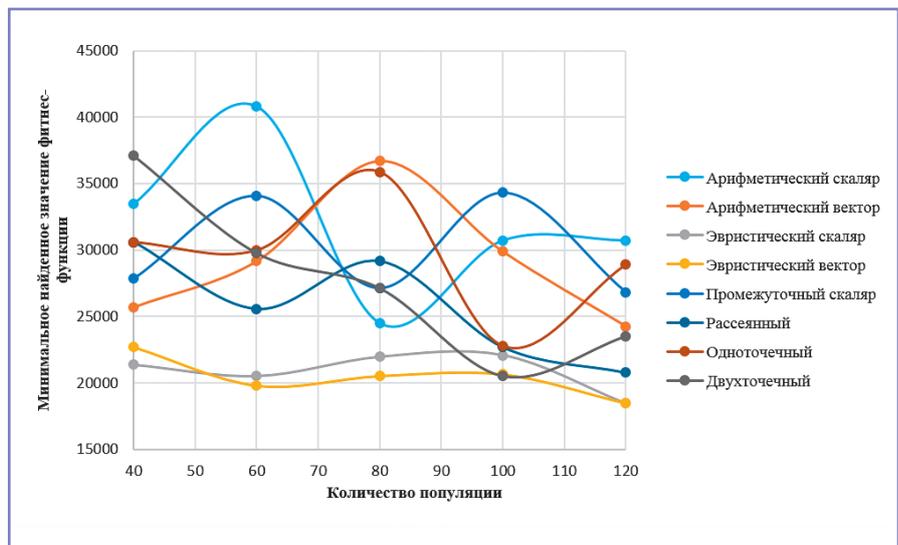


Рис. 10. Зависимость минимального найденного значения фитнес-функции от размера популяции и алгоритма кроссинговера

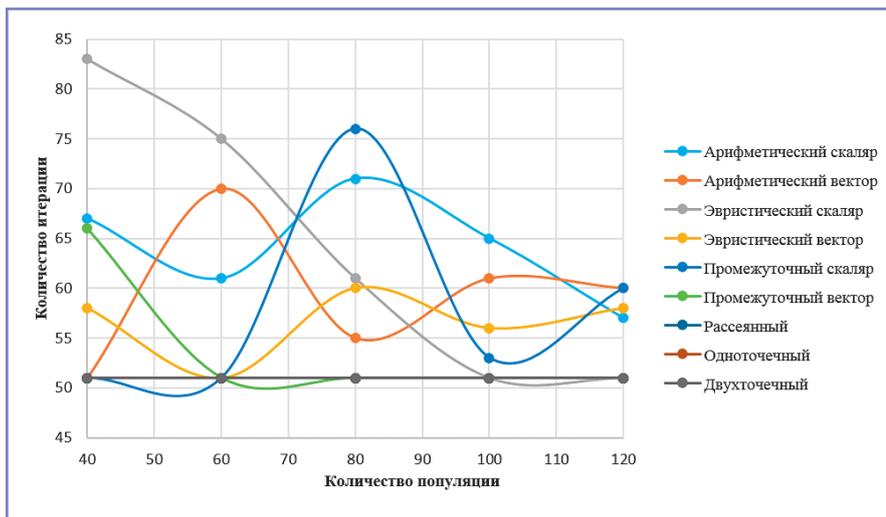


Рис. 11. Зависимость выполненного количества итераций от размера популяции и алгоритма кроссингвера

поддержки принятия решения (СППР), позволяющей выполнять численное решение оптимизационных задач генетическими алгоритмами. Данные, приведенные на графиках, позволяют проанализировать функционирование различных алгоритмов кроссингвера.

При одной и той же начальной популяции (совокупность особей, рассматриваемая на итерации эволюции) разные алгоритмы кроссингвера приводят к правильному решению (признаком остановки работы алгоритма является то, что значение фитнес-функции изменяется медленнее допустимого) за разное количество итераций, различающееся почти на треть. При этом не всегда увеличение числа итераций приводит к уменьшению значения фитнес-функции, значения которой могут различаться более чем в два раза (рис. 9).

Рис. 10–11 иллюстрируют зависимость параметров решения задачи от размера популяции. Из информации, представленной на графиках, видно, что увеличение размера популяции приводит к тому, что при всех алгоритмах кроссингвера завершение работы ГА происходит после меньшего количества итераций. При этом различие между

минимальными найденными значениями фитнес-функции при использовании различных алгоритмов кроссингвера сокращается.

### Литература

1. Сидоренко В.Г., Чжо Мин Аунг. Применение генетических алгоритмов к решению задачи планирования работы электроподвижного состава метрополитена // Электроника и электрооборудование транспорта, № 6, 2016. – С. 13–16.
2. Thomas Weise. Global optimization algorithms. Theory and application: Genetic Algorithms, 2009, p. 141–156.
3. Crossover (genetic algorithm), 31 Июль 2017. [В Интернете]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Crossover\\_\(genetic\\_algorithm\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Crossover_(genetic_algorithm)).
4. Сидоренко В.Г., Филипченко К.М. Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов. Информатизация образования и науки. – М.: ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информика», т. 4, № 28, 2015, с. 123–132.
5. Сидоренко В.Г., Чжо Мин Аунг. Автоматизированное управление безопасностью эксплуатации электроподвижного состава метрополитена // Труды XXIV международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: РГГУ, 2016. – С. 202–205.

### Сидоренко Валентина Геннадьевна

Родилась в 1972 году. В 1994 году окончила Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Автоматика и управление в технических системах». Доктор технических наук, профессор. В 2004 году защитила диссертацию по теме «Методологическое и алгоритмическое обеспечение автоматизации управления движением поездов метрополитена». Опыт работы – более 20 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) и профессором кафедры «Моделирование и оптимизация бизнес-процессов» НИУ ВШЭ. Имеет 171 научный труд.

### Чжо Мин Аунг

Родился в 1991 году. В 2014 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Управление и информатика в технических системах». В настоящее время учится в аспирантуре кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ). Имеет 13 научных трудов.

### Sidorenko Valentina

She was born in 1972. In 1994 she graduated from the Moscow Institute of Railway Engineering (MIIT), majoring in Automation and Control of Technical Systems. She is Doctor of Technical Sciences, Professor. In 2004, she defended her thesis on the topic «Methodological and algorithmic support of the traffic control automation of tube trains». She has more than 20 years of work experience. At present she works as professor at «Information management and protection» department of Russian University of Transport (MIIT) and professor of «Modeling and optimization of business processes» department of the Higher School of Economics. He has 171 scientific papers.

### Zhuo Ming Aung

Was born in 1991. In 2014 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering majoring in «Automation and control in engineering systems». At present he studies in postgraduate school of «Management and data protection» department of Moscow State University of Railway Engineering. He has 13 scientific works.

# Оценка потенциала ветровой электроэнергетики для использования в системе тягового электроснабжения железных дорог

// Estimation of the potential of wind power for use in traction power supply system of railways //

Шевлюгин М.В., д. т. н., доцент, Зеленская И.В., РУТ (МИИТ), Москва

Жуматова А., к. т. н., Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы

Приведен краткий анализ возможности использования ветровых источников энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог. Представлены результаты экспериментальных исследований и статистической обработки данных по длительному мониторингу показателей силы ветра в Южном регионе Республики Казахстан. Разработан алгоритм формирования случайной зависимости значений параметров ветра по заранее определенным законам распределения с целью дальнейшего моделирования работы ветровых электроустановок в составе тяговых подстанций системы электроснабжения железных дорог. Описаны структурная схема ветровых тяговых подстанций и возможные режимы ее работы. Получены зависимости распределения величины скорости ветра, соответствующие нормально-логарифмическому закону распределения, и длительности порывов ветра, соответствующие нормальному закону распределения, а также зависимости кинетической энергии ветра с пересчетом на электроэнергетический потенциал ветровых электроустановок. Представлен интерфейс программы для оценки показателей работы конкретных типов ветровых электрогенераторов при конкретных параметрах ветровой нагрузки. **Ключевые слова:** ветровая энергия, ветровые электроустановки, тяговые подстанции переменного тока, система тягового электроснабжения железных дорог.

Одним из наиболее доступных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является ветер. Ветровая энергетика обладает огромным потенциалом, является экологически чистой, имеет

*A brief analysis of the possibility of using wind energy sources in the traction power supply system of railways is given. The results of experimental studies and statistical processing of data on long-term monitoring of wind power in the Southern region of the Republic of Kazakhstan are presented. An algorithm for the formation of a random dependence of the values of wind parameters according to predetermined distribution laws has been developed, with the aim of further modeling the operation of wind power plants in the traction substations of the railroad power supply system. The structural scheme of wind traction substations and possible modes of its operation are described. The dependences of the wind velocity distribution corresponding to the normal-logarithmic, and the duration of the gusts of the wind, corresponding to the normal distribution laws, as well as the dependence of the kinetic energy of the wind with recalculation on the electric power potential of the wind installations, are obtained. The interface of the program for estimating the performance of specific types of wind power generators under specific wind load parameters is presented.*

**Keywords:** wind energy, wind power plants, traction substations of alternating current, traction power system of railways.

меньшую себестоимость производимой энергии в сравнении с традиционными ТЭС, и поэтому

данное направление нетрадиционной энергетики активно развивается как в технологическом смысле, так и в отношении ввода новых генерирующих мощностей (рис. 1).

С развитием ветровой электроиндустрии расширяется и круг объектов, электроснабжение которых можно осуществлять посредством рассматриваемого вида энергии. Создание ветровых электрогенераторов мегаваттного порядка дает возможность использования данного вида энергии не только в малой энергетике, но и в электроснабжении достаточно мощных энергосистем, в том числе в системе тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог, которая является одним из наиболее мощных потребителей электроэнергии в региональных масштабах [1, 10].

Внедрение ветровых источников энергии в СТЭ железных дорог отдельных районов с высоким ветроэнергетическим потенциалом позволит в значительной степени снизить дефицит существующих генерирующих мощностей и повысить экологичность вырабатываемой энергии. Однако в большинстве регионов России среднегодовая скорость ветра не превышает 5 м/с, что затрудняет использование мощных ветровых электрогенераторов (ВЭГ) с горизонтальной осью вращения, начальным

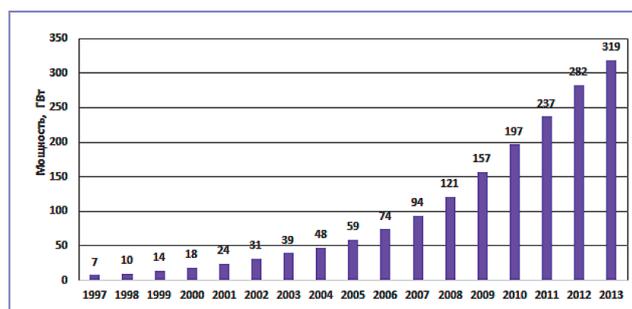


Рис. 1. Суммарные установленные мощности ветрогенераторов по данным WWEA (Всемирной ветроэнергетической ассоциации)

Таблица 1. Потенциалы возобновляемых энергетических ресурсов Казахстана

Наименование	Энергетические ресурсы		
	малых ГЭС <10 МВт	солнца	ветра
Освоенный потенциал, млрд кВт·ч в год	0,4	-	-
Экономический потенциал, млрд кВт·ч в год	7,5	-	0,82
Технически возможный потенциал, млрд кВт·ч в год	21	-	3,3–6,6
Теоретический потенциал, млрд кВт·ч в год	65	3,9–5,4	1820

рабочим порогом скорости ветра в 3–5 м/с и выходом на номинальную мощность в 10–11 м/с. Необходимые условия для эффективного использования энергии ветра соблюдаются в районах северного побережья, на Дальнем Востоке и в горной части России.

Особый интерес для внедрения ВЭГ на территории стран СНГ представляет полигон железных дорог Республики Казахстан. В таблице 1 представлены результаты анализа по наиболее значимым потенциалам ВИЭ, который показал, что запасы малой гидроэнергии непосредственно для нужд СТЭ железных дорог малопригодны по причине недостаточной мощности и в связи с определенными климатическими условиями, а именно из-за сезонности ее выработки. Геотермальная энергетика Казахстана имеет многочисленные локальные точки, но из-за низкотемпературного порога (не более 96 °С) и удаленности от железнодорожных магистралей использование их для поставленной задачи крайне затруднительно; использование

энергии биомассы на данный период развития этого направления еще более затруднительно; использование световой энергии для поставленной задачи не представляется возможным по причине малой удельной мощности световых элементов (придется покрывать большие площади) и, самое главное, из-за суточной смены дня и ночи.

Проведенный анализ показал, что из всего многообразия ВИЭ по доступности, экологичности и масштабам использования в районах Казахстана для СТЭ железных дорог приоритетной является энергия ветра, которая может быть трансформирована в электрическую единичной мощности ВЭУ до 5 МВт. В то же время энергия ветра характеризуется высоким потенциалом практически во всех зонах Республики Казахстан, причем по показателю среднегодовой скорости ветра эта энергия, как правило, более доступна по стоимости, чем другие виды ВИЭ. Именно поэтому данный вопрос активно обсуждается на государственном уровне, сопровождается многочисленными

распоряжениями и законами, в том числе и Законом Республики Казахстан от 4 июля 2009 года «О поддержке использования возобновляемых источников энергии». При оценке потенциала ветровой энергии для нужд СТЭ железных дорог использовались результаты экспериментов ряда международных проектов по исследованию ветровой нагрузки в районе Каратау в Южном регионе Республики Казахстан [2]. В сотрудничестве с германской фирмой Senior Consultant, Renewable Energies – Wind Energy процедура замеров начата в 2007 году на специально созданных метеостанциях и по базовой программе PC400 проектно-строительной фирмы «НАР». Обработка указанных данных производилась с помощью программы, разработанной в интегрированной среде Turbo Delphi с использованием пакета Statistics системы MATLAB (рис. 2). На рис. 2. представлен интерфейс программы, где 1 – экспериментальные данные по скорости ветра в течение года по месяцам, 2 – зависимость вероятности распределения скорости ветра за один из исследуемых месяцев. По этим данным видно, что в течение года не полностью сняты показания, что было связано с техническими неполадками. Первичная обработка определяет среднюю скорость ветра за расчетный период, периоды с наименьшим ветроэнергетическим потенциалом, характер распределения уровня ветра в процентном соотношении, что позволяет грубо оценить возможность использования ВЭУ для СТЭ железных дорог в данном районе.

Помимо этого, разработанная программа по уже известным параметрам ветровой нагрузки (среднее значение ветра, среднеквадратическое отклонение, закон распределения, параметры порывов и пр.) позволяет синтезировать случайную зависимость мгновенных значений скорости ветра от времени. Данный алгоритм представлен на рис. 3 и используется в том случае, когда частично или полностью отсутствуют данные по мгновенным значениям ветра в течение значительного периода времени (например, месяцы июль, октябрь, ноябрь на рис. 2). В будущем теоретически синтезированная ветровая нагрузка может быть использована в качестве исходных данных в имитационной модели работы так называемых ветровых тяговых подстанций (ТП) в составе СТЭ железных дорог.

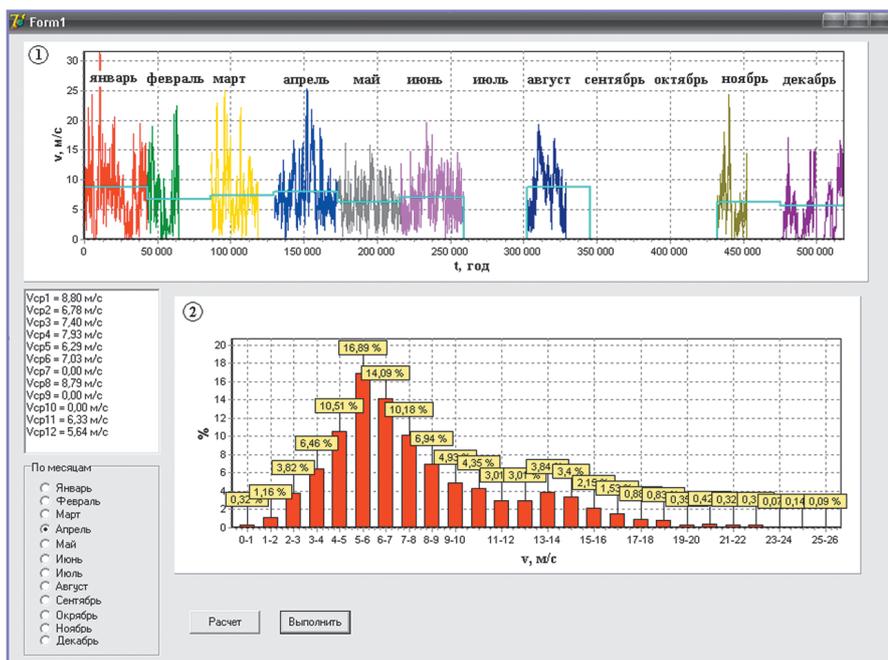


Рис. 2. Результаты обработки экспериментальных данных по ветру за год



Рис. 3. Алгоритм формирования случайной зависимости значений скорости ветра по известному закону распределения

Исследования показали, что распределение величины скорости ветра соответствует нормально-логарифмическому закону, а распределение длительности порывов ветра – нормальному. Поэтому для формирования случайных зависимостей скорости ветра используются нормальный закон распределения для длительности порывов ветра с параметрами  $m_n$  и  $\sigma_n$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины  $x_n$ , а также логарифмически нормальный закон с параметрами  $\alpha$  и  $\beta$  для амплитуды скорости ветра.

Для моделирования случайных чисел, распределенных по нормальному закону, использовался генератор псевдослучайных чисел (ГСЧ)  $\xi$ , равномерно распределенных в интервале от 0 до 1 с помощью стандартной подпрограммы Turbo Delphi RANDOM. Затем с использованием уравнений преобразования равномерно распределенной величины формируется последовательность случайных чисел, распределенных по нормальному закону. В данной задаче используются формулы, предложенные Муллером и позволяющие получать пару сопряженных независимых значений  $\eta_1$  и  $\eta_2$ :

$$\eta_1 = \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{1}{\xi_i}\right)} \cdot \cos(2\pi \cdot \xi_{i+1}),$$

$$\eta_{i+1} = \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{1}{\xi_i}\right)} \cdot \sin(2\pi \cdot \xi_{i+1}).$$

Нормальное распределение величин моделируется по формулам

$$x_j = m_x + \sigma_x \cdot \eta_j,$$

$$x_{j+1} = m_x + \sigma_x \cdot \eta_{j+1}.$$

Логарифмически нормальное распределение величин моделируется по формулам

$$V_j = e^{\alpha_V + \beta_V \cdot \eta_j},$$

$$V_{j+1} = e^{\alpha_V + \beta_V \cdot \eta_{j+1}}.$$

Для проверки согласованности теоретического и статистического распределений используется критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - kp_i)^2}{kp_i},$$

где  $n$  – число разрядов статистического ряда ветровой нагрузки,  $k$  – число реализаций (объем статической совокупности),  $m_i$  – количество попаданий в  $i$ -й разряд статистического ряда,  $p_i$  – теоретическая вероятность попадания случайной величины в  $i$ -й разряд статистического ряда,  $kp_i$  – теоретическое количество попаданий случайной величины в  $i$ -й разряд.

Разработанная программа позволяет произвести расчеты, на основании которых можно не только сделать предварительные выводы о целесообразности использования энергии ветра в расчетных районах местности для нужд электрической тяги, но и синтезировать

теоретическую ветровую нагрузку для дальнейшего использования в моделировании работы ВЭУ в составе СТЭ железных дорог, оценить сезонную составляющую энергии ветра и в случае неравномерности ветровой нагрузки в течение суток скорректировать график движения поездов (например, в апреле – рис. 2 – ветровая нагрузка сравнительно высокая и равномерна по времени суток, из чего следует, что график движения поездов может быть также равномерным). При этом стоит отметить, что по данным испанских компаний Gamesa Eolica и WinWind точность прогнозов выдачи энергии ветростанций при почасовом планировании на рынке на день вперед или в спотовом режиме превышает 95%.

Принципиальная структурная схема и возможные режимы работы ТП с ВЭУ (далее – ветровая тяговая подстанция (ВТП)) для электрифицированной железной дороги переменного тока показаны на рис. 4. В состав ВТП вместо традиционного силового оборудования должны входить ветровой электрогенератор в сочетании с преобразовательным агрегатом и накопителем энергии (НЭ) достаточно большой энергоемкости [3, 4]. В качестве НЭ может быть использован инерционный накопитель (ЕНЭ) [5, 6], сверхпроводниковый индуктивный НЭ [7, 8] или НЭ на основе аккумуляторных батарей (АБ) [9]. Анализ основных типов НЭ показал, что для решения поставленной задачи целесообразнее использовать ЕНЭ или АБ.

Режим работы ВТП следующий (рис. 4, где показаны схемы ВТП и включения ВТП в СТЭ железной дороги): при отсутствии поездной нагрузки электроэнергия ВЭГ, вырабатываемая в блоке 1, накапливается в НЭ блока 2. При подходе электропоезда (Э) ВТП начинает подпитывать его с помощью ВЭГ. В момент проезда вблизи ВТП поезд потребляет от подстанции максимальный тяговый ток. При отсутствии необходимого ветра параллельно к ВЭГ подключается НЭ, обеспечивая необходимую мощность. Основным смыслом работы системы при этом заключается в том, что ВЭГ постоянно работает на полную мощность (если имеется необходимая сила ветра), питая поездную нагрузку и параллельно обеспечивая подзаряд собственного НЭ или НЭ соседних ВТП. Сам НЭ работает в импульсном режиме, обеспечивая

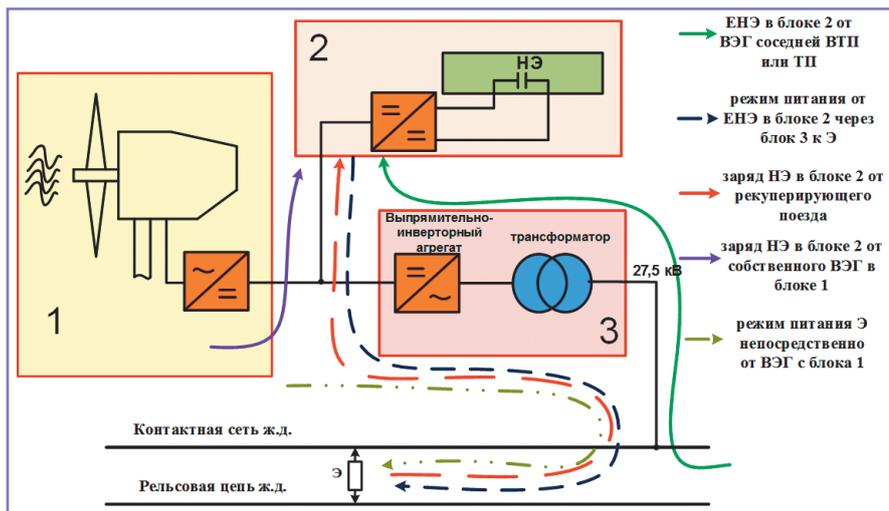


Рис. 4. Структурная схема ВТП и возможные режимы ее работы

энергией броски пусковых и далее тяговых токов. При необходимости (в случае недостаточной силы ветра в данном районе) подпитка ВТП для подзаряда НЭ может обеспечиваться от соседних ВТП или от традиционных ТП с системой первичного электроснабжения через ЛЭП, прямо по тяговой сети, то есть через контактную сеть и рельсовую цепь.

Важным этапом является моделирование процесса работы ВЭУ в составе СТЭ железных дорог переменного тока с учетом реальных зависимостей скорости ветра в функции времени, а также технических характеристик основных отечественных и зарубежных промышленно выпускаемых ВЭУ.

По методу общей оценки ветрового потенциала и производительности ВЭУ, при известных характеристиках ветра, можно перейти к электротехническим и эксплуатационным показателям ВЭУ: принимаем, что поток ветра с поперечным сечением  $S$  обладает кинетической энергией, определяемой выражением

$$A_v = \frac{mV^2}{2} = \frac{\rho SV^3}{2},$$

где  $m = \rho SV$  – масса воздуха,  $\rho$  – плотность воздуха,  $V$  – мгновенная скорость ветра, определяемая по данным наблюдений или моделирования,  $S$  – площадь сечения ветрового потока. Однако полностью кинетическую энергию ветра преобразовать в движение ветряного ротора практически невозможно – ее долю определяет коэффициент использования энергии ветра  $\xi$ , который оценен как

$$\xi = \frac{C_x S \frac{\rho}{2} (V-U)^2 U}{S \frac{\rho}{2} V^3} = C_x (V-U)^2 \frac{U}{V^3}.$$

Полную мощность ветрового потока  $M$  можно описать произведением силы ветра  $F_v$  на скорость  $V$ . Реальная мощность ветра должна учитывать коэффициент использования

$$Mv = F_v V \xi = F_v C_x (V-U)^2 \frac{U}{V^2},$$

где  $C_x$  – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления,  $(V-U)$  – относительная скорость набегания ветра на поверхность,  $U$  – скорость, с которой перемещается рабочая поверхность (лопасти турбины).

В зависимости от условий работы, ландшафта, показателей ветровой нагрузки оценивается электроэнергетический потенциал ВЭУ с пересчетом уже на электрическую мощность, которая может быть отдана в СТЭ:

$$A_v = \int_0^T F_v C_x (V-U)^2 \frac{U}{V^2} dt = A_{ВЭУ} = \int_0^T P_{ВЭУ} dt = \int_0^T (I_{ВЭУ} U_{ВЭУ} - \Delta P_{ВЭГ} - \Delta P_{ПА}) dt,$$

где  $A_{ВЭУ}$  – энергия ВЭУ, отданная в СТЭ,  $P_{ВЭУ}$  – мощность,  $I_{ВЭУ}$  и  $U_{ВЭУ}$  – ток и напряжение ВЭУ,  $\Delta P_{ВЭГ}$  и  $\Delta P_{ПА}$  – потери мощности в электрогенераторе и преобразовательном агрегате.

Для оценки электроэнергетических показателей работы ВЭУ разработана прикладная программа (вид интерфейса показан на рис. 5), которая в зависимости от показателей ветровой нагрузки и места расположения ВЭУ (то есть районной ветровой нагрузки) позволяет определить наиболее подходящий тип ВЭГ, рассчитать интегральные и мгновенные электроэнергетические показатели всей ветровой электроустановки, то есть мгновенные мощности, и выработку энергии в течение расчетного периода времени. На рис. 5 приведен пример, где ① и ③ – технические характеристики выбранного типа ВЭУ – SWT-2.3–93 (при скорости ветра 11 м/с будет достигнута номинальная мощность 2300 кВт), ② – смоделированная зависимость мгновенной мощности ВЭУ указанного типа от времени, которая в последующем будет использована в качестве исходных данных для моделирования работы СТЭ с ВЭУ, ④ – интегральные показатели работы ВЭУ, то есть для конкретного случая средняя мощность ВЭГ составила 800 кВт при скорости ветра 7,93 м/с, максимальная мощность ВЭГ

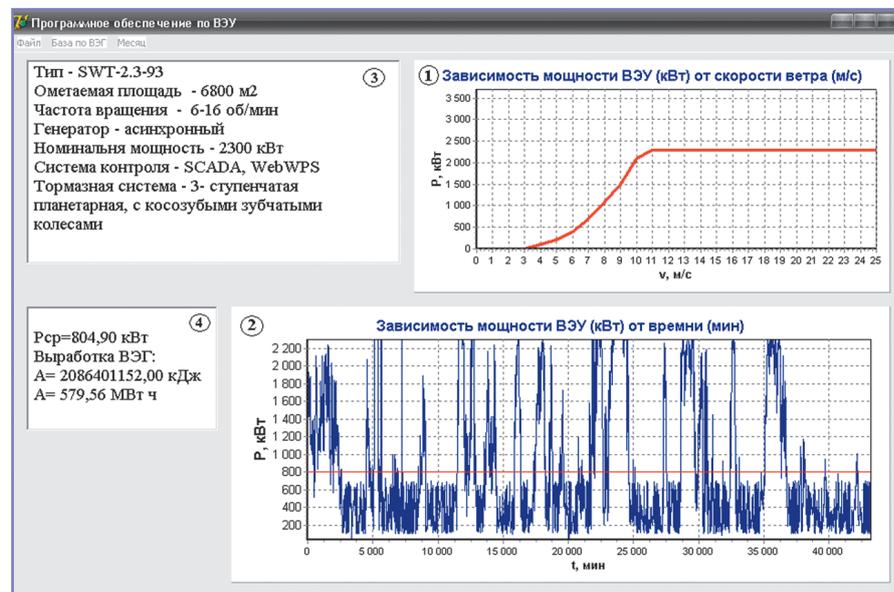


Рис. 5. Интерфейс программы с примером оценки показателей работы ВЭУ при конкретных параметрах ветровой нагрузки

составила 2300 кВт при скорости ветра от 11 м/с, выработка электроэнергии за расчетный период времени составила примерно 580 МВт\*ч. В данном случае можно сделать вывод, что для использования на ВТП в составе СТЭ при соответствующих условиях понадобится как минимум 3 ВЭГ указанного типа с энергетическим буфером в виде НЭ, емкость которого должна определяться в зависимости от размеров движения исследуемого участка железной дороги.

### Литература

1. Жуматова А.А., Шевлюгин М.В. Возможность использования возобновляемых источников энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог // Наука и техника транспорта. – М., 2008. № 4. – С. 25–28.
2. Шевлюгин М.В., Жуматова А.А. Экспериментальный анализ ветрового потенциала Юго-Казахстано-Каратауских зон и Джунгарских ворот для использования в электроэнергетических системах железнодорожного транспорта // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2009. № 2 (57). – С. 231–235.
3. Шевлюгин М.В. Повышение энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения железных дорог с помощью накопителей энергии // Наука и техника транспорта. 2007. № 1. – С. 68–73.
4. Шевлюгин М.В. Совершенствование системы тягового электроснабжения с помощью накопителей энергии // Соискатель – приложение к журналу «Мир транспорта». 2007. Т. 04. № 1. – С. 35–38.
5. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии // Наука и техника транспорта. 2008. № 1. – С. 15–20.
6. Шевлюгин М.В. ЕНЭ на борту метропоезда // Мир транспорта. 2007. Т. 5. № 1 (17). – С. 46–49.

7. Шевлюгин М.В. Энергосбережение на железнодорожном транспорте с помощью сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии // Наука и техника транспорта. 2008. № 2. – С. 67–70.

8. Шевлюгин М.В., Лобынцев В.В. Сверхпроводимость притормозила на пороге подстанций // Мир транспорта. 2006. Т. 4. № 1 (13). – С. 44–47.

9. Бадёр М.П., Бычкова М.П., Гречишников В.А., Шевлюгин М.В. Возможность использования накопителей энергии BPS на базе аккумуляторных батарей GIGACELL в СТЭ Московского метрополитена // Электроника и электрооборудование транспорта. 2010. № 5–6. – С. 23–26.

10. Котельников А.В., Шевлюгин М.В., Жуматова А.А. Распределенная генерация электроэнергии в системе тягового электроснабжения железных дорог на основе ветровых электроустановок // Электротехника. № 9. ISSN 0013–5860. – М.: ЗАО «Знак», 2017. – С. 40–45.

#### Шевлюгин Максим Валерьевич

Родился в 1973 году. В 1996 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог». Доктор технических наук, доцент. В 2014 году защитил докторскую диссертацию на тему «Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии». В настоящее время работает в МИИТ на кафедре «Электроэнергетика транспорта» в должности профессора. Имеет свыше 140 научных трудов.

#### Зеленская Инесса Владиславовна

Родилась в 1995 году. В настоящее время является студенткой Российского университета транспорта (МИИТ) и работает на кафедре «Электроэнергетика транспорта» в должности техника 1-й категории. Имеет 2 научные работы.

#### Жуматова Асель

Родилась в 1981 году. В 2003 году окончила Казахскую академию транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. Кандидат технических наук. В 2010 году защитила кандидатскую диссертацию на тему «Проблемы использования возобновляемых источников энергии для системы тягового электроснабжения». В настоящее время работает сеньор-лектором на кафедре «Энергетика» Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева. Имеет 15 научных трудов.

#### Shevliugin Maxim

Was born in 1973. In 1996 he has graduated from the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with specialization in «Power supply of the electrified railways». Ph.D. in Technical Sciences, assistant professor. In 2014 he has defended a Ph.D. thesis on a topic «Energy-saving technologies in railway transport and subway that are realized with the use of energy storage system». Now he is working in MIIT on chair «Electric power engineering of transport». He has more than 140 treatises.

#### Zelenskaya Inessa

Was born in 1995. Currently, she is a student of the Russian University of Transport (MIIT) and works at the Department of Electrical Power Engineering of Transport as a technician of the 1st category. Has 2 scientific works.

#### Zhumatova Assel

Was born in 1981. In 2003 she graduated from the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev. Candidate of Technical Sciences. In 2010 she defended her thesis on «Problems of using renewable energy sources for traction power supply system». Currently working as a seignior lecturer at the Department of Power Engineering of the Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva. She has 15 scientific works.

# Информационно-диагностическая система контроля технического состояния инфраструктуры и подвижного состава метрополитена

// Information-diagnostic system of control of technical condition of infrastructure and rolling stock //

**Алексеев В.М., д. т. н., профессор, Российский университет транспорта (МИИТ), Москва**

*В статье рассматриваются вопросы построения систем диагностики для подвижного состава совместно с инфраструктурой устройств метрополитенов. Представлено обоснование применения протоколов обмена в системах диагностики со встроенными алгоритмами защиты, обладающих большей функциональностью, направленных на построение диалоговых обменов информацией между обслуживающим персоналом и системой диагностики. Рассмотрены вопросы измерения с применением моделей ЦОС и построения моделей диагностики с применением методов самоорганизации, в частности метода группового учета аргументов. В заключении сделан вывод о том, что СТД позволяет повысить технико-эксплуатационные характеристики устройств подвижного состава и инфраструктуры, достичь более высокого социально-экономического эффекта.*

*Ключевые слова:* диагностика, параметр, модель измерения, модель самоорганизации, решающая функция.

*The article examines the construction of diagnostic systems for rolling stock in conjunction with the infrastructure devices on the subways. The article is justification of application of the protocols in the diagnostics systems, with built-in protection algorithms with more functionality aimed at building the dialog exchanges between staff and system diagnostics. In the article the questions of measurement using models of TSOs and modelling diagnostics using the methods of self-organization, such as the method of group accounting of arguments. In conclusion, it is concluded that STD allows to increase technical and operational characteristics of the devices rolling stock and infrastructure to achieve higher socio-economic effect.*

*Keywords:* diagnostics, parameter, measurement model, self-organization model, decision function.

Структура системы показана на рис. 1. Система состоит из подсистемы сбора информации, обеспечивающей доставку информации от территориально распределенных подвижных и стационарных объектов системы, включенных в ИДС-Метро, и обслуживающего персонала до центра обработки информации, в котором сосредоточены серверы приложений и хранилища БД. Для организации передачи информации используются протоколы, обеспечивающие доставку разнородного трафика от объектов. Взаимодействие обслуживающего персонала в рамках системы ИДС-Метро обеспечивается сервисами почты, ip-телефонии, портала с календарями событий, видеозвонков, отправки мгновенных сообщений и видеоконференций.

Реализация сбора и передачи измеренных данных для подсистем диагностики строится на использовании протокола xmpp и http, поддерживаемого объектными контроллерами с соответствующим URL, присваиваемым контролирующему оборудованию системы ИДС-Метро и мобильному персоналу.

Метрополитен является одним из главных транспортных средств обеспечения скоростной доставки пассажиров. Обеспечение безопасности перевозок – приоритетный фактор качественного функционирования метрополитена. Реализация этой задачи предполагает применение информационно-диагностической системы (ИДС) контроля состояния подвижных объектов и устройств, повышающих безопасность перевозок. Применение современных аппаратно-программных средств совместно с программным обеспечением в ИДС для контроля устройств позволит обеспечить [1, 2]:

- более высокую надежность их функционирования;
- использование технического прогнозирования с целью сокращения издержек в обслуживании;
- своевременность обслуживания и предупреждение отказов.

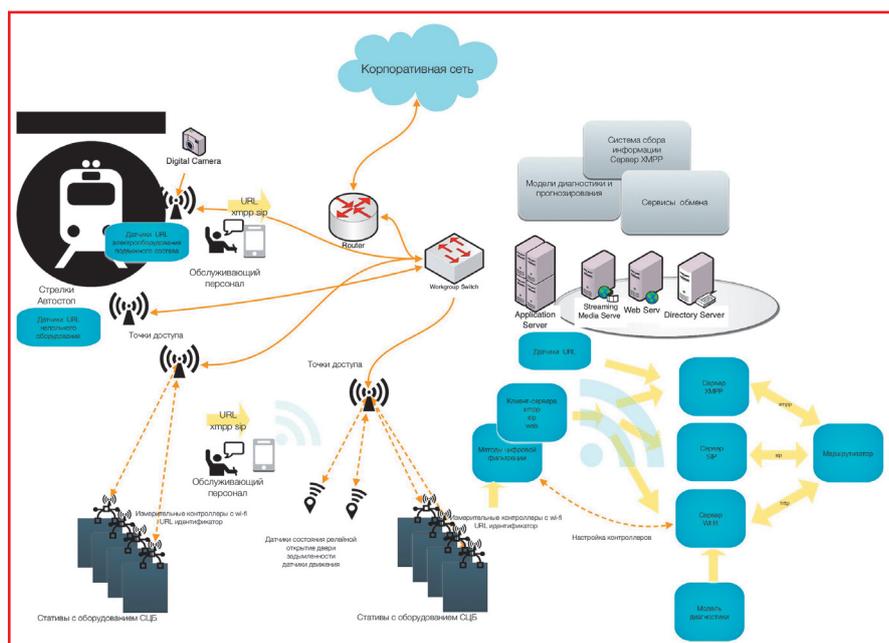


Рис. 1. Взаимодействие технических средств ИДС с инфраструктурой и подвижным составом



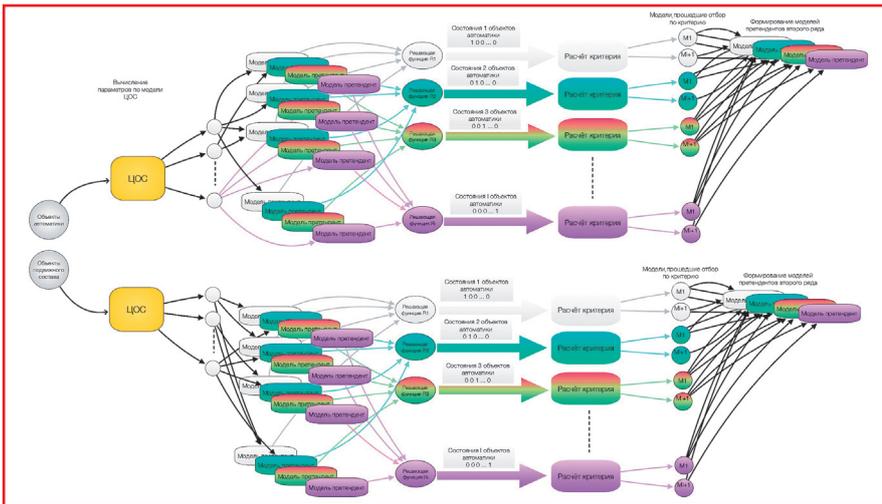


Рис. 3. Процесс построения и обучения модели диагностики

быть идентифицированы персоналом, то есть им даны логические описания. Таким образом идентификация неучтенных состояний (если контролируемый объект изменяет свое состояние на неучтенное) в дальнейшем осуществляется персоналом после устранения возникшей причины. Например, воздействие тягового тока из-за изменения сопротивления рельсовых нитей приводит к измерению значений параметров на питающем и релейных концах рельсовой цепи. Нормальный режим работы и шунтовой при этом могут выполняться рельсовой цепью. Новое неучтенное состояние идентифицируется как нормальный режим рельсовой цепи с воздействием асимметрии тягового тока по причине изменения сопротивления элементов рельсовых линий.

Поиск решающих правил в модели диагностики осуществляется с использованием метода группового учета аргументов [3]. На первом этапе выбирается опорная функция, которая связывает попарно параметры. Вид опорной функции зависит от характера возникающих зависимостей на объектах контроля, но обязательным является присутствие членов произведения параметров. Используются ряды Колмогорова – Габора и дробно-рациональные полиномы.

Построение моделей диагностики представлено на рис. 3. Параметры  $x_i$  попарно связываются в модели претендентов  $M_k(l)$ , где  $l = 1, \dots, m$  – точки проверочной последовательности. Строится матрица выходов решающих правил в главной диагонали, в которой расположены 1, а в остальных элементах 0. Это означает, что на выходе множества решающих правил срабатывает один, которому соответствовала 1, все

остальные решающие правила должны давать значение, близкое к 0. Критерий отбора моделей претендентов:

$$KR(k) = \frac{\sum_{l=1}^m (M_k(l) - R_k(l))^2}{\sum_{l=1}^m R_k(l)^2} \quad (2)$$

В следующий ряд проходят модели-претенденты, имеющие наименьшее значение вычисленного критерия и обеспечивающие однозначную идентификацию состояний контролируемого объекта.

На втором ряду отбора в качестве моделей используются модели-претенденты, прошедшие во второй ряд. Условие пропуска моделей во второй ряд: количество параметров равно числу моделей-претендентов.

Критерий остановки поиска  $k$ -й модели:  $KR(k)$  меньше заданного значения 0,0005 из условия выполнения достоверности контроля.

В случае возникновения отказа, не входящего в список диагностируемых состояний, необходимо его идентифицировать (дать описание возникшей неисправности) и провести переобучение с поиском новых решающих правил.

Использование метода группового учета аргументов обеспечивает построение решающих правил для заданных состояний рельсовой цепи и других объектов контроля с учетом заданных уровней достоверности при контроле технического состояния. Модель диагностики является обучаемой и применима к различным устройствам, где необходимо использовать функциональные методы диагностики на эксплуатируемых объектах.

Таким образом, внедрение ИДС позволяет достичь следующих технико-экономических результатов:

- повысить надежность функционирования оборудования и перейти к эффективному методу обслуживания по состоянию;
- в связи с уменьшением затрат на обслуживание сократить обслуживающий персонал за счет применения прогнозирования;
- повысить эффективность (сократить время обслуживания) и обеспечить соблюдение технологического режима обслуживания контролируемых устройств подвижного состава и инфраструктуры.

Социальный эффект от внедрения ИДС состоит в повышении надежности функционирования устройств, участвующих в перевозочном процессе, снижении количества отказов, улучшении условий перевозки пассажиров и обеспечении их безопасности, повышении скорости доставки пассажиров.

### Литература

1. Алексеев В.М., Дмитриенко И.Е. Измерения в устройствах автоматики и телемеханики. – М.: Маршрут, 2011.
2. Алексеев В.М., Баранов Л.А. Итерационный метод цифрового измерения // Сборник научных трудов 892. – М.: МИИТ, 1996.
3. Иващенко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: Наукова Думка, 1982.
4. Лавров В.А., Дурнев А.В. Методы и средства диагностического контроля слаботочных электромагнитных реле // Надежность. 2015; (1): 39–52. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-1-39-52.
5. Research on the test system for electrical parameters of relay based on STM32 / Zhen Zhou, Zehong Lv, Kangkang Guo, Li Liang, College of Measure-Control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, China, Published in: Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015 Fifth International Conference Date of Conference: 18–20 Sept. 2015. Date Added to IEEE Xplore: 15 February 2016.

### Алексеев Виктор Михайлович

Родился в 1954 году. В 1976 году окончил Омский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Автоматика, телемеханика и связь». Доктор технических наук, профессор. В 1999 году защитил диссертацию по теме «Самоорганизующиеся системы диагностики устройств железнодорожной автоматики и телемеханики». Опыт работы – более 39 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ). Имеет более 70 научных трудов, 4 патента.

### Alekseev Victor

He was born in 1954. In 1976 he graduated from the Omsk Institute of Railway Transport Engineering majoring in Automation, Telemechanics and Telecommunications. He is Doctor of Technical Sciences, Professor. In 1999 he defended his thesis on the topic «Self-organizing systems for diagnostics of railway automation and telemechanics devices». He has more than 39 years of work experience. At present he works as a professor at the department «Information Management and Protection» Russian University of Transport. He has more than 70 scientific papers, 4 patents.