

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,
(495) 557-23-95
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.nppteuz.ru

Подписано в печать:
30.07.2015 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 1093.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

- Герман Л.А., Новиков Е.В., Кишкурно К.В., Петров Д.В.**
Сравнительная оценка способов симметрирования тока и напряжения на тяговых подстанциях переменного тока 2
- Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Гаврилов И.В., Муратова-Милехина А.С.**
Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и расчёта параметров петли короткого замыкания 7
- Гарбузов И.И.**
Энергетическая оценка эффективности рекуперации на электровозах переменного тока 13
- Кишкурно К.В.**
О формировании программы совместного расчёта систем тягового и внешнего электроснабжений. 18
- Феоктистов В.П., Литовченко В.В., Чуверин Ю.Ю., Назаров Д.В., Малютин А.Ю.**
Стендовые испытания тяговых электрических машин методом самоторможения 21
- Овсянников Е.М., Клюкин П.Н., Акимов А.В.**
Производство водорода с помощью систем рекуперации энергии на борту транспортного средства 24

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Волокитина Е.В., Смирнов Д.С., Хорошавин В.С., Охапкин С.И.**
Качественный анализ эффективности применения различных топологий преобразователей в бортовых электроприводах 28
- О Волокитиной Е.В. 34*
- Доманов В.И., Доманов А.В., Гаврилова С.В.**
Параметрические системы управления многодвигательного электропривода грузоподъемных механизмов 35

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

- Козловский В.Н., Пьянов М.А., Полякова Е.В., Ютт В.Е., Зятров А.В.**
Современный методико-алгоритмический аппарат измерения качества комплекса электрооборудования автомобилей 39

ИНФОРМАЦИЯ

- Краснов Л.А.**
О выплате вознаграждения авторам изобретений, полезных моделей и других результатов интеллектуальной деятельности, созданных при выполнении финансируемых Российским научным фондом научных, научно-технических программ и проектов 44
- Краснов Л.А.**
О предоставлении субсидий Фонду содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. 45
- Краснов Л.А.**
О продлении срока подачи заявления о признании действия исключительных прав, удостоверенных официальными документами Украины 46
- Научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения» . 47*

Сравнительная оценка способов симметрирования тока и напряжения на тяговых подстанциях переменного тока

// Comparative evaluation of methods of balancing current and voltage on the AC traction substations //

Герман Л. А., д.т.н., профессор,
Нижегородский филиал Московского государственного
университета путей сообщения (МИИТ), г. Нижний Новгород

Новиков Е. В., к.т.н., Кишкурно К. В.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

Петров Д. В.,
ООО «Риттал», г. Канаш

В статье дана сравнительная оценка использования трех способов симметрирования тока и напряжения с помощью симметрирующего трансформатора и установок продольной и поперечной емкостных компенсаций. Для сравнения построены графики несимметрии тока и напряжения. Обозначены преимущества и недостатки каждого из способов симметрирования. Показана высокая эффективность снижения несимметрии напряжения на шинах 27,5 кВ установкой продольной емкостной компенсации, включенной в отсасывающую линию тяговой подстанции.

Ключевые слова: симметрирование тока и напряжения, установка продольной емкостной компенсации, установка поперечной емкостной компенсации, двухфазный симметрирующий трансформатор, сравнительная оценка, эффективность.

Несимметрия напряжения в системах 25 и 2 x 25 кВ негативно влияет на электроснабжение потребителей тяговых подстанций: от линии ДПР, от третьей обмотки трансформатора и от трансформатора собственных нужд. Несимметрия напряжения затрудняет эффективную работу автоматики регулирования напряжения трансформаторов УРПН. Для снижения несимметрии на тяговых подстанциях известно применение однофазных установок поперечной емкостной компенсации, включенных на отстающую фазу, однофазных установок продольной емкостной компенсации, включенных в отсасывающую линию тяговых подстанций, и симметрирующих трансформато-

In this article is review comparative evaluation of the use of the three methods of balancing of voltage and current using unbalanced-to-balanced transformer, the direct compensation plant and quadrature compensation plant. For comparison, graphs of the unbalance current and voltage were built. Advantages and disadvantages of each method of balancing are listed. The high efficiency of reduction of voltage unbalance at the buses 27.5 kV is proved by direct compensation plant is included in the return feeder of the traction substation.

Keywords: balancing of voltage and current, direct compensation plant, quadrature compensation plant, two-phase unbalanced-to-balanced transformer, comparative evaluation, efficiency.

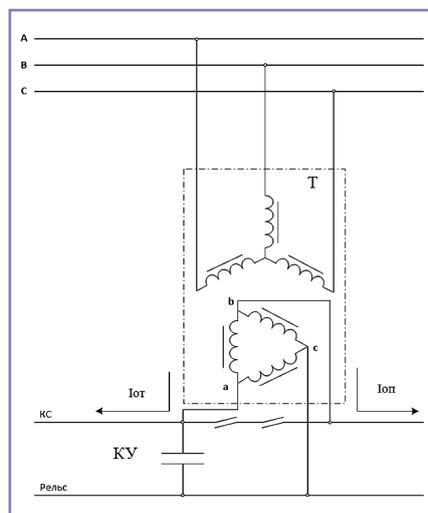


Рис. 1. Симметрирование с помощью КУ, включенной в отстающую фазу.

ров, использующих принцип симметрирования по схеме трансформатора Скотта. Разборов способов и устройств снижения несимметрии на тяговых подстанциях в технической литературе имеется немало [1–7], однако нет сравнительной оценки эффективности их применения на действующих участках тягового электроснабжения.

Цель статьи заключается в сравнении и объективной оценке эффективности применения выбранных способов симметрирования. В расчетах рассматриваем тяговый трансформатор типа ТДТНЖ-40000/110. Расчеты выполнены для одного трансформатора, и оценка эффективности вариантов производилась путем определения степени снижения исходной несимметрии напряжения по обратной последовательности.

Рассмотрение вариантов начнем с симметрирования токов и напряжений с помощью КУ (рис. 1).

Несимметрия тока тягового трансформатора со схемой «Звезда – треугольник»

Модуль тока обратной последовательности тяговой подстанции равен [5]

$$|I_2'| = \frac{1}{3} \sqrt{I_{оп}^2 + I_{от}^2 + 2 I_{оп} I_{от} \cos(2\theta + \varphi_{оп} - \varphi_{от})} \quad (1)$$

где $I_{оп}$, $I_{от}$ – токи опережающей и отстающей фаз соответственно;

θ – сдвиг фазы между отстающей и опережающей фазами;

$\varphi_{оп}$ и $\varphi_{от}$ – угол сдвига фаз обеих однофазных нагрузок.

Модуль тока прямой последовательности

$$|I_1| = \frac{1}{3} \sqrt{I_{оп}^2 + I_{от}^2 + 2 I_{оп} I_{от} (\varphi_{оп} - \varphi_{от})} \quad (2)$$

Коэффициент несимметрии по току для трансформатора по схеме «Звезда – треугольник» равен [5]

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{1+n^2+2n \cos(2\theta+\varphi_{от}-\varphi_{оп})}{1+n^2+2n \cos(\varphi_{от}-\varphi_{оп})}} \quad (3)$$

где $n = I_{оп}/I_{от}$.

Если принять $\varphi_{оп} = \varphi_{от}$ то

$$\alpha_i = \sqrt{(1+n^2+2n \cos 2\theta)/(n+1)} \quad (4)$$

Для тягового трансформатора со схемой «Звезда – треугольник» $\theta = 60^\circ$, поэтому

$$\alpha_i = \sqrt{(1+n^2-n)/(n+1)} \quad (5)$$

Кривые коэффициента несимметрии по току построены на рис. 2 (α_i без КУ и α_i ДСТ).

Несимметрия тока при включении установки поперечной емкостной компенсации (КУ) в отстающую фазу тяговой подстанции и симметрирующего трансформатора

При включении КУ в отстающую фазу коэффициент несимметрии по току рассчитывается по формуле [2]

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{n^2+1+m^2-n-2m[\sin \varphi_{от}+n \cos(\varphi_{оп}+30^\circ)]}{n^2+1+m^2+2n-1,2m(n+1)}} \quad (6)$$

где $n = I_{оп}/I_{от}$; $m = I_{кот}/I_{от}$;

I_H – номинальный ток фазовой обмотки трансформатора;

$I_{кот}$ – ток КУ.

В расчетах принимаем $\varphi_{оп} = \varphi_{от} = 37^\circ$.

По формулам (5) и (6) рассчитаны коэффициенты несимметрии по току для $m = 0/0,6/1,0/1,2$ (рис. 2, кривые α_i (без КУ/0, 6КУ/1, 0КУ/1, 2КУ)).

Существенное снижение несимметрии при включении КУ наблюдается вблизи $n = 1$. При соотношении нагрузки $0,3 < n < 1,5$ несимметрия снижается в 2–4 раза, а при $1,5 < n < 2$ – снижение в 2–1,5 раза, при $n > 2$ снижение незначительное.

Следует иметь в виду, что при изменении n в общем случае изменяется $I_{от}$ и, следовательно, $I_{кот}$. Это значит, что при построении графиков (рис. 2) предполагается, что КУ регулируемая.

Для сравнения покажем кривую коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности при симметрирующем трансформаторе.

Для схемы Скотта $\theta = 90^\circ$ и коэффициент несимметрии по току равен

$$\alpha_i = (1-n)/(1+n) \quad (7)$$

Обычно в технической литературе принято определять коэффициент

несимметрии по следующей формуле с модулем для получения положительных значений

$$\alpha_i = |(1-n)/(1+n)| \quad (8)$$

По рис. 2 (кривая α_i ДСТ) видно, что симметрирующий трансформатор снижает несимметрию тока до нуля вблизи $n = 1$, а при значениях $0,3 < n < 3$ – до 1,5–5 раз.

Несимметрия напряжения при включении установки поперечной емкостной компенсации в отстающую фазу тяговой подстанции (КУ)

Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности определяется

$$K_{2U} = |U_2|/|U_1| \cong |U_2|/|U_H| \quad (9)$$

где U_H – номинальное напряжение тяговой обмотки трансформатора;

U_1 ; U_2 – напряжения прямой и обратной последовательностей.

На основании [1] запишем

$$K_{2U} \% = \frac{I_{отx}}{3U_H} \sqrt{n^2 - n + 1 + m^2 - 2m[\sin \varphi_{от} + n \cos(\varphi_{оп} + 30^\circ)]} 100\% \quad (10)$$

Подставляя $x = \frac{u_{к\%} U_H}{I_H 100}$ и $I_H = \frac{S_T}{3U_H}$,

где $u_{к\%}$ – напряжение тока короткого замыкания;

x – реактивная составляющая сопротивления фазы трансформатора;

S_T – номинальная мощность трансформатора,

получаем формулу

$$K_{2U} \% = \frac{bu_{к\%}}{300} \sqrt{n^2 - n + 1 + m^2 - 2m[\sin \varphi_{от} + n \cos(\varphi_{оп} + 30^\circ)]} 100\% \quad (11)$$

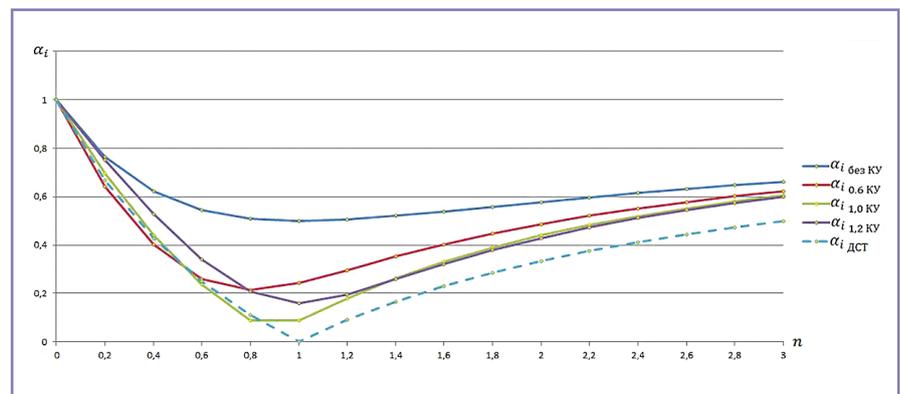


Рис. 2. График коэффициента несимметрии тока в зависимости от соотношения плеч питания тяговой сети.

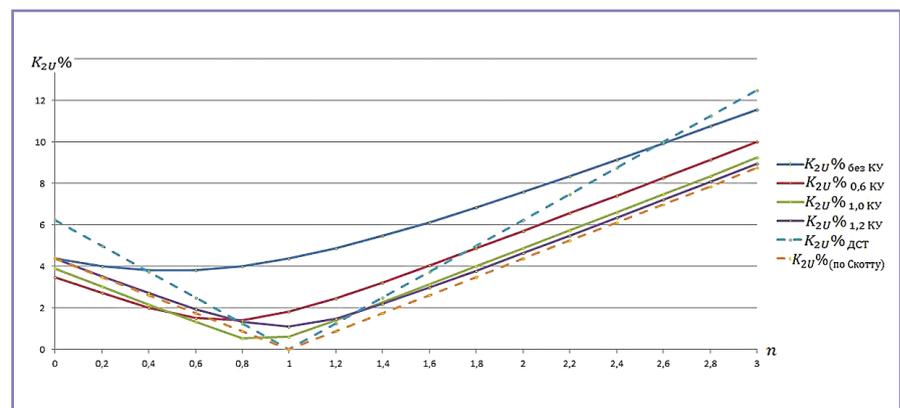


Рис. 3. График коэффициента несимметрии напряжения в зависимости от соотношения плеч питания тяговой сети (при $m = 0,6 / 1,0 / 1,2$).

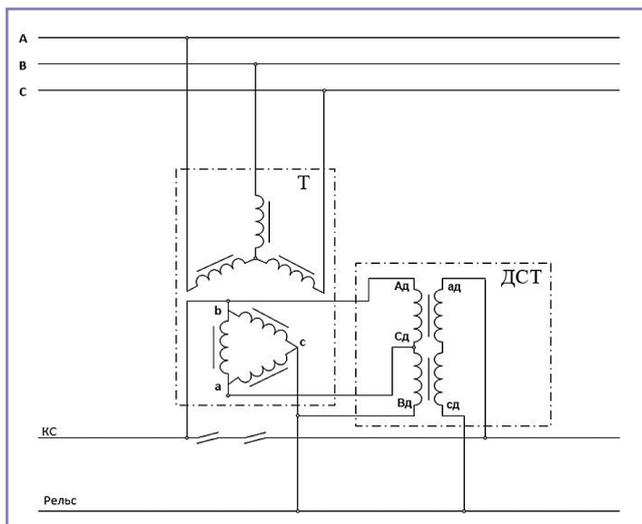


Рис. 4. Включение симметрирующего трансформатора ДСТ.

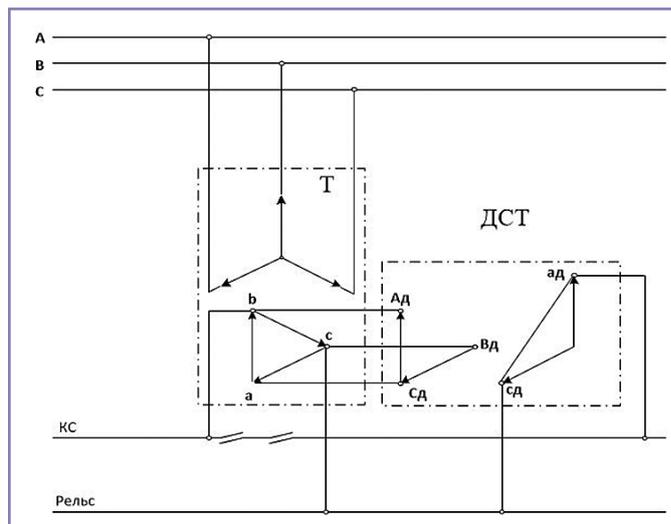


Рис. 5. Векторная диаграмма подстанции с двухфазным симметрирующим трансформатором.

На основании (11) построены графики на рис. 3 (кривые K_{2U} без КУ/ $K_{2U} 0,6$ КУ/ $K_{2U} 1,0$ КУ/ $K_{2U} 1,2$ КУ).

По оценке степени снижения несимметрии при включении КУ стало ясно, что наилучший эффект в снижении несимметрии получен при $m = 1$, а существенное снижение несимметрии наблюдается вблизи $n = 1$. При соотношении нагрузки $0,3 < n < 1,5$ несимметрия снижается в 2–4 раза, а при $1,5 < n < 3,0$ – снижение в 2–1,5 раза.

Для сравнения покажем кривые коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности с симметрирующим трансформатором (K_{2U} ДСТ) и трансформатором

Скотта (K_{2U} по Скотту)). Принимаем условие, что трансформатор Скотта включен взамен существующего трансформатора, тогда исходное сопротивление подстанции с трансформатором Скотта не изменяется.

Несимметрия напряжения при включении симметрирующего трансформатора

Для отечественных железных дорог разработаны двухфазные приставки с симметрирующим трансформатором (ДСТ), выполненные по принципу схемы Скотта [3], которые снижают несимметрию по току (рис. 4).

Первичная обмотка ДСТ включается к вторичной обмотке существующего трансформатора со схемой «Звезда – треугольник» и формирует вектор напряжения, который подают в контактную сеть, отличающийся на 90° от вектора напряжения другого плеча питания. Тем самым реализуется принцип симметрирования тока и напряжения, сформированный по схеме Скотта.

Однако в связи с плохим использованием мощности ДСТ дополнительно разработаны однофазные симметрирующие приставки мень-

шей мощности ДМФЖСМ-6300/35, которые обеспечивают параллельную работу тяговых подстанций [4]. Приставки включаются на каждое плечо питания, естественно, увеличивают сопротивление подстанции.

Параметры ДСТ: мощность – 20 МВА, вторичная обмотка – 27,5 кВ, $u_k = 6,5\%$.

Как показано на рис. 5, от ДСТ на контактную сеть подано напряжение «а_д-с_д», вектор которого повернут на 90° по отношению к вектору «вс» другого плеча питания контактной сети. Другими словами, получен эффект симметрирования по принципу схемы Скотта.

Проведем расчеты несимметрии по напряжению. Напряжение обратной последовательности при включении симметрирующего трансформатора равно [2]

$$K_{2U} = \frac{bu_{k\%}}{300} \sqrt{n^2 + 2n \cos(2\theta + \varphi_{оп} - \varphi_{от}) + 1} \quad (12)$$

Если $\varphi_{оп} = \varphi_{от}$, а для симметрирующего трансформатора $\theta = 90^\circ$, то коэффициент несимметрии равен

$$K_{2U}\% = \frac{bu_{k\%}}{300} \sqrt{n^2 - 2n + 1} = \frac{bu_{k\%}}{300} (n - 1) \quad (13)$$

где $b = I_{от} / I_{н'}$, принимаем наибольшее значение $I_{от} = 1,25 I_{н'}$.

По аналогии с (8) расчеты по (13) выполним с учетом введения модуля полученных значений. Результаты расчета представлены на рис. 3 и 7.

Как было сказано, при использовании приставок с симметрирующими трансформаторами сопротивле-

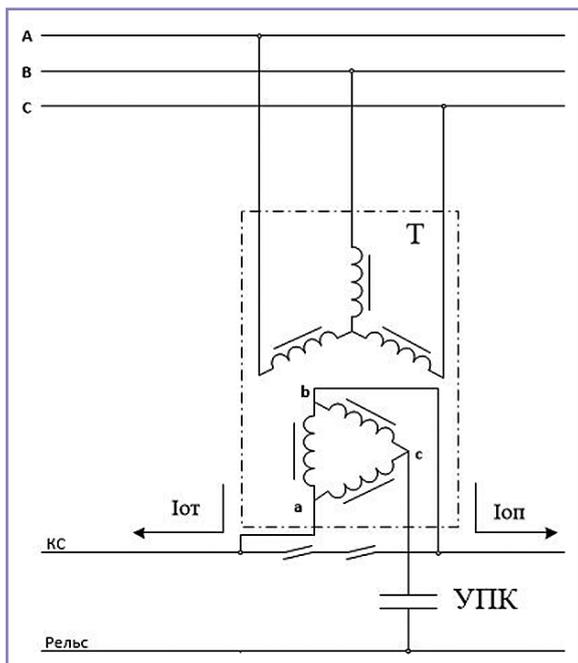


Рис. 6. Симметрирование с помощью УПК, включенной в отсасывающую линию.

ние трансформатора увеличивается. В [4] при испытании симметрирующей приставки показано увеличение сопротивления подстанции. На основании этой работы в первом приближении принимаем увеличение индуктивного сопротивления подстанции при включении симметрирующего трансформатора в 1,5 раза, на основании этого построены пунктирные кривые коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности на рис. 3 и 7 (кривая K_{2U} ДСТ). Для сравнения представлена кривая K_{2U} (по Скотту), когда существующий трансформатор заменен симметрирующим трансформатором, то есть сопротивление существующей подстанции не изменилось.

Несимметрия напряжения при включении установки продольной емкостной компенсации (УПК)

УПК не меняет перераспределение токов в трансформаторе, следовательно, не влияет на коэффициент несимметрии по току. Однако влияние УПК, включенной в отсасывающую линию тяговой подстанции, на несимметрию напряжения по обратной последовательности существенно [1]. Определим коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции при включении УПК в отсасывающую линию тяговой подстанции (рис. 6). Модуль напряжения обратной последовательности при включении УПК равен [1]

$$U'_2 = \sqrt{(n^2 - 2n \cos(\Delta\varphi + 60^\circ) + 1) + n^2 A - n(B \cos \Delta\varphi - \sqrt{3}C \sin \Delta\varphi) + D} \quad (14)$$

где A, B, C, D – коэффициенты, зависящие от степени компенсации.

УПК в фазах. Для варианта УПК в отсасывающей линии коэффициенты в формуле (14) равны

$$A = C = D = \frac{1}{3}(k_p^2 - 3k_p) \\ B = \frac{1}{3}(-k_p^2)$$

где $k_p = X_{cp}/X_n$ – соотношение сопротивлений УПК к сопротивлению фазы подстанции, которое рассчитывается по схеме трансформатора «Звезда – звезда».

Принимаем для расчетов $\varphi_{от} = \varphi_{он}$, тогда $\Delta\varphi = 0$ и

$$U'_2 = \frac{I_{от} X_n}{3} \times \\ \times \sqrt{(n^2(A+1) - n(B+1) + D) + 1} \quad (15)$$

Взяв производную U'_2 в (15) по переменной k_p и приравняв ее к нулю, определим степень компенсации УПК для получения минимальной несимметрии. В результате степень компенсации равна

$$k_p = 3(n^2 + 1)/2(n^2 + n + 1) \quad (16)$$

При $0 < n < 3$ наименьшее значение несимметрии по (16) будет при $1 \leq k_p \leq 1,15$. Рекомендуется принять $k_p = 1$.

По аналогии получения выражения (11) из (10) запишем выражение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности для варианта включения УПК в отсасывающую линию тяговой подстанции

$$K_{2U} \% = \frac{bu_k \%}{300} \times \\ \times \sqrt{(n^2(A+1) - n(B+1) + D) + 1} \times 100\% \quad (17)$$

Все обозначения в (17) те же, что и при рассмотрении (11) и (14).

Итак, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности определяется по формуле (17), результаты расчета представлены на рис. 7. Как видно, наибольшее снижение несимметрии получается при $k_p = 1$ (кривая $K_{2U} 1,0$ УПК): при $n = 1$ $K_{2U} = 0$, а при $0,3 < n < 3$ коэффициент несимметрии снижается в 2 раза и более.

Для сравнения на рис. 7 показана кривая напряжения обратной последовательности на шинах 27,5 кВ при включении симметрирующего трансформатора. Видно, что по эффективности снижения напряжения обратной последовательности вариант включения УПК в отсасывающий провод имеет явное преимущество перед симметрирующим трансформатором и его приставками: при n вблизи 1 несимметрия нулевая (так же, как и при симметрирующих трансформаторах), однако при n больше 1,2 или меньше 0,8 несимметрия в 2–3 раза и более меньше, чем при симметрирующих трансформаторах.

Указанное очень важно для действующих тяговых подстанций, так как одновременно с включением КУ и УПК улучшается режим компенсации реактивной мощности и напряжения в тяговой сети и одновременно уменьшается несимметрия напряжения на шинах 27,5 кВ. Последнее важно для повышения эффективности работы устройства регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой, а также для улучшения режима напряжения собственных нужд подстанции, ЛЭП автоблокировки и ДПР.

Выводы

1. Установки поперечной и продольной емкостных компенсаций в тяговой сети повышают уровень напряжения и компенсируют реактивную мощность – это их основные задачи. Однако они одновременно способствуют снижению несимметрии режима шин 27,5 кВ тягового трансформатора.

2. При отношении токов плеч питания от 0,3 до 3 снижение несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах 27,5 кВ происходит установками продольной емкостной компенсации в 2–3

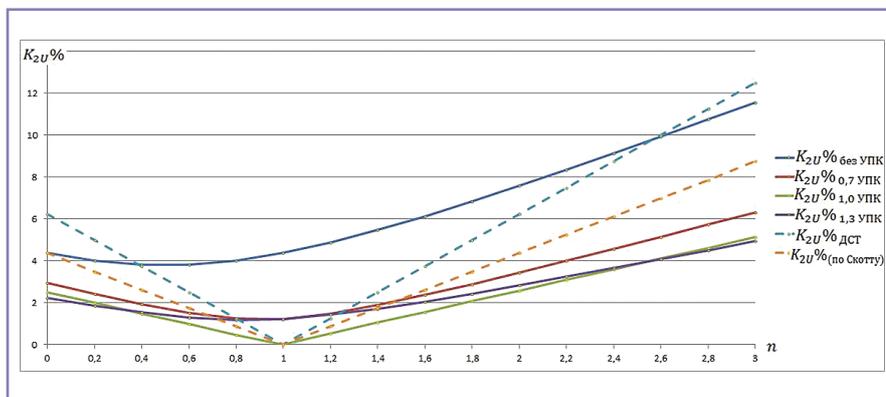


Рис. 7. График зависимости коэффициента несимметрии напряжения от отношения плеч питания тяговой сети.

раза и более, а установкой поперечной емкостной компенсации – в 1,5–2 раза и более при условии, что она выполнена регулируемой.

3. Эффективность разработанных приставок ДСТ и ДМФЖСМ к тяговому трансформатору системы 25 кВ определяется в основном снижением несимметрии токов. В результате снижается несимметрия токов на первичной обмотке трансформатора с соответствующим положительным эффектом.

4. Что касается несимметрии напряжения по обратной последовательности, то в связи с увеличением сопротивления тяговой подстанции при включении разработанных приставок их эффективность уступает эффекту снижения несимметрии при работе установок поперечной и продольной емкостных компенсаций: при работе регулируемой КУ несимметрия снижается в среднем в 1,5–4 раза, а при УПК – в 2 раза и более, вплоть до полного устранения несимметрии напряжения.

Литература:

1. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт. 1983. – 183 с.
2. Тамазов А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. – М.: Транспорт, 1965. – 235 с.
3. Бородулин Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока. Вестник ВНИИЖТ № 2. – 2003.
4. Сероносов В. В., Иванов М. А., Каратаев В. Г. Исследование работы фазосдвигающей приставки к трансформатору тяговой подстанции переменного тока. Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте: материалы Пятого Международного симпозиума «Элтранс-2009» – СПб.: ПГУПС, 2010, с. 427–434.
5. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

6. Герман Л. А., Кишкурно К. В., Гончаренко В. П., Мизинцев В. А. Эффективность применения установок продольной емкостной компенсации в тяговых сетях переменного тока железных дорог. Промышленная энергетика № 1. – 2015, 22–25 с.

7. Василянский А. М., Мамошин Р. Р., Якимов Г. Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц // Железные дороги мира, 2002, № 8, с. 40–51.

Герман Леонид Абрамович – родился в 1937 году. Окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик» (1959 г.). Защитил докторскую диссертацию по теме: «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрификация и электроснабжение» Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения. Является членом-корреспондентом Российской Академии транспорта. Автор более 350 научных трудов, 70 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

Новиков Евгений Владимирович – родился в 1984 году. В 2006 году окончил Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС) по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Кандидат технических наук. В 2012 году защитил диссертацию по теме: «Методы, анализы надежности сложных технических систем инфраструктуры железнодорожного транспорта». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрификация и электроснабжение железных дорог» МГУПС (МИИТ). Имеет 26 научных трудов.

Кишкурно Константин Вячеславович – родился в 1991 году. В 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». В настоящее время является аспирантом кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» Московского государственного уни-

верситета путей сообщения. Имеет 4 статьи, 1 патент.

Петров Денис Вячеславович – родился в 1992 году. В 2014 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электроэнергетика транспорта». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает менеджером технической поддержки в ООО «Риттал».

German Leonid – was born in 1937. He has graduated Moscow Institute of Transport Engineers by specialty «Engineer routes – electrician» (1959). He has defended the dissertation by the theme: «Theory and practice of improving treatment system traction below the AC power plants with capacitive compensation». He is a Doctor of Technical Sciences, Professor of dept. «Electrification and Utilities» at The Nizhny Novgorod branch of the Russian State University of transport communications. He is a corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. Author of more than 350 scientific works, 70 inventions and patents. Has 2 government awards.

Novikov Evgeniy – was born in 1984. In 2006 he graduated from Far East State Communications University (DVGUPS) with specialization in «Automation, telemechanics and communication in railway transport». He is a candidate of Engineering Sciences. In 2012 he defended the dissertation by the theme: «Methods, analysis of reliability of complex technical infrastructure systems of railway transport». His work experience is 11 years. At present he works as associate professor at the department «Electrification and electrical supply of railroads» in MGUPS (MIIT). He has 26 scientific works.

Kishkurno Konstantin – was born in 1991. In 2012 he graduated from Moscow State of Railway University (MIIT), speciality is «Railway roads power supply». At present he is an advanced student of «Electric railway roads power supply» chair of Moscow State of Railway University. He has 4 articles, 1 patent.

Petrov Denis – was born in 1992. In 2014 he graduated from Moscow State of Railway University (MIIT) with specialization in «Transport electric power industry». His work experience is 3 years. At present he works as technical support manager in «Rittal» LLC.

Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и расчета параметров петли короткого замыкания

// Detail structures traction ac networks for modeling and dimensioning of short-circuit loop //

Быкадоров А. Л., д.т.н., профессор,
Заруцкая Т. А., к.т.н.,
Гаврилов И. В.,

ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет
пути сообщения», г. Ростов

Муратова-Милехина А. С.,
ОАО «Роствертол», г. Ростов

Дистанционное определение места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока является актуальной, сложной и до конца не решенной задачей. Связано это с многообразием и неоднородностью элементов, образующих тяговую сеть. В данной статье рассматриваются для сравнения несколько вариантов моделей, составленных с разной степенью детализации, и исследуется влияние детализации на удельное сопротивление тяговой сети и сопротивление петли короткого замыкания. Анализ в отдельности по активной и индуктивной составляющим, полному сопротивлению и фазовому углу в зависимости от расстояния до места КЗ позволяет более глубоко понять причину погрешности и неточности в существующих методиках дистанционного определения места КЗ. Полученные результаты показывают, что при решении задач, связанных с определением места короткого замыкания, необходимо использовать модели с большей детализацией элементов тяговой сети, чем принято сегодня.
Ключевые слова: короткое замыкание, тяговая сеть, детализация, модель, удельное сопротивление, балластная призма, глубокая земля, параметры аварийного режима, повышение точности расчетов, моделирование электрических процессов.

Определение места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока является актуальной, сложной и до конца не решенной задачей. Связано это с многообразием и неоднородностью элементов, образующих тяговую сеть, взаимным элект-

Remote short circuit location in AC electric traction network is a complicated and important issue that is yet to be resolved. This is accounted for by diversity and heterogeneity of the traction network elements. This article considers and compares a range of models having different degree of detalization and examines effect detalization has on specific resistance of the electric traction network and fault path resistance. Separate analysis of power and induction components, impedance and phase angle depending on the distance to SC location provides for better understanding of causes of miscalculation and inaccuracy in the existing methods of remote short circuit location. According to the obtained results, it is necessary to use models featuring higher detalization of the traction network elements than that employed today to solve short circuit location tasks.

Keywords: short circuit, electric traction network, detalization, model, specific resistance, ballast section, deep earth, parameters of emergency conditions, enhancing computational accuracy, electric process simulation.

ромагнитным влиянием элементов сети. Наиболее сложным элементом является рельсовая цепь, которая через балластную призму связана с землей. Токи в земле создают наведенный ток в рельсовой цепи. На сопротивление рельсовой цепи вли-

яют протекающий по рельсам ток и токи утечки, которые зависят от сезонного состояния переходного сопротивления.

В совокупности перечисленные факторы формируют нелинейный характер сопротивления тяговой сети, что влияет на параметры петли короткого замыкания. Существующие методы расчета используют эквивалентирование элементов тяговой сети для упрощения ее структуры [1, 2, 3, 4, 5, 8]. Такой подход вполне приемлем при расчетах потерь напряжения, потерь энергии, расчета токов короткого замыкания. В последние годы серьезно повышены требования точности определения места короткого замыкания. Удовлетворительной может считаться погрешность 200–250 м. Очевидно, что методы, связанные с определением места короткого замыкания в тяговой сети, должны базироваться на моделях с более тонкой структурой тяговой сети. Современные компьютерные технологии позволяют успешно решать подобные задачи.

В данной статье рассматриваются для сравнения несколько вариантов моделей, составленных с разной степенью детализации. Параметры элементов этих моделей ($Z_{П}$ – сопротивление контура «Провод – земля»; $Z_{М}$ – сопротивление взаимоиндукции между контурами; $Z_{ЭК}$ – эквивалентное сопротивление контактного провода и несущего троса) определялись по известным формулам [1, 2, 4, 5, 6]. Численные значения элементов моделей принимались для следующих условий: рельсы Р65; контактная подвеска ПБСМ70 + МФ100; проводимость земли $5 \cdot 10^{-3}$ См/м; расстояние между контактной сетью и рельсами – 6,55 м. Рассматривались режимы короткого замыкания.

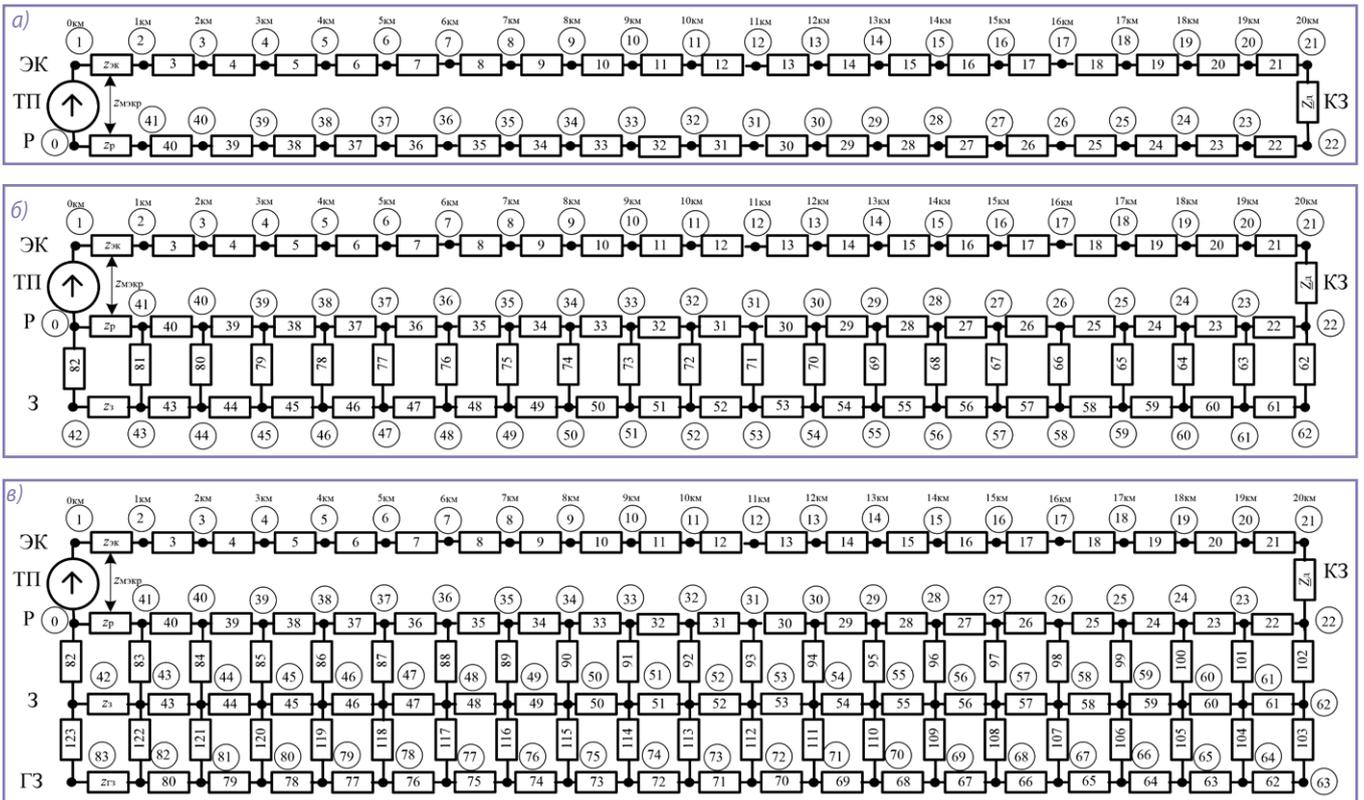


Рис. 1. Варианты моделей однопутного участка тяговой сети с односторонним питанием: а) модель № 1; б) модель № 2; в) модель № 3.

На примере однопутного участка с односторонним питанием исследовались три варианта моделей тяговой сети с различной степенью детализации рельсов, структуры переходного сопротивления балластной призмы и земли. Цель исследования состояла

в определении влияния детализации элементов тяговой сети на удельное сопротивление тяговой сети и сопротивление петли короткого замыкания.

На рис. 1а представлена модель № 1 однопутного участка с односторонним питанием. В этой модели

удельное сопротивление рельсов Z_p выбиралось по справочным данным, в которых, как известно [1, 4, 5, 6], собственное сопротивление рельсов эквивалентировано с осредненным переходным сопротивлением «Рельсы – земля».

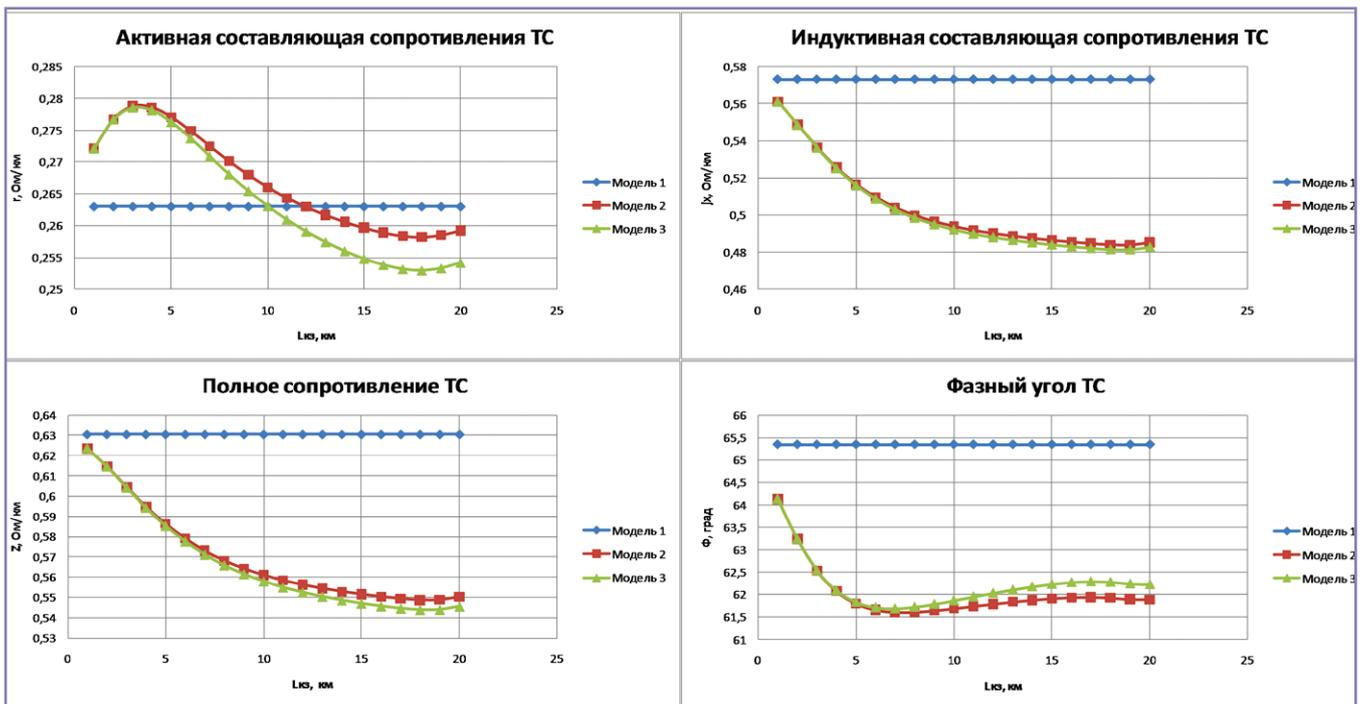


Рис. 2. Графики зависимости удельных сопротивлений тяговой сети от расстояния до места КЗ.

Таблица 1. Удельные сопротивления тяговой сети и петли КЗ.

Место КЗ, км	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км			
1 км	0,26 + j0,57	0,27 + j0,56	0,27 + j0,56
10 км	0,26 + j0,57	0,27 + j0,49	0,26 + j0,49
20 км	0,26 + j0,57	0,26 + j0,49	0,25 + j0,48
Сопротивления петли КЗ, Ом			
1 км	3,26 + j0,57	3,27 + j0,56	3,27 + j0,56
10 км	5,63 + j5,73	5,66 + j4,94	5,63 + j4,92
20 км	8,26 + j11,46	8,18 + j9,7	8,08 + j9,65

поверхности земли; P-3 – балластная призма; ГЗ – уровень земли на глубине 10 м; 3-ГЗ – слой земли толщиной 10 м; $z_{эк}$ – удельное эквивалентное сопротивление контактной сети, Ом/км; z_p – удельное сопротивление рельсовой цепи, Ом/км; z_3 – удельное сопротивление земли, Ом/км; $z_{ГЗ}$ – удельное сопротивление глубокой земли, Ом/км; $z_{мэлр}$ – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью и рельсовой цепью, Ом/км; Z_d – сопротивление дуги, Ом.

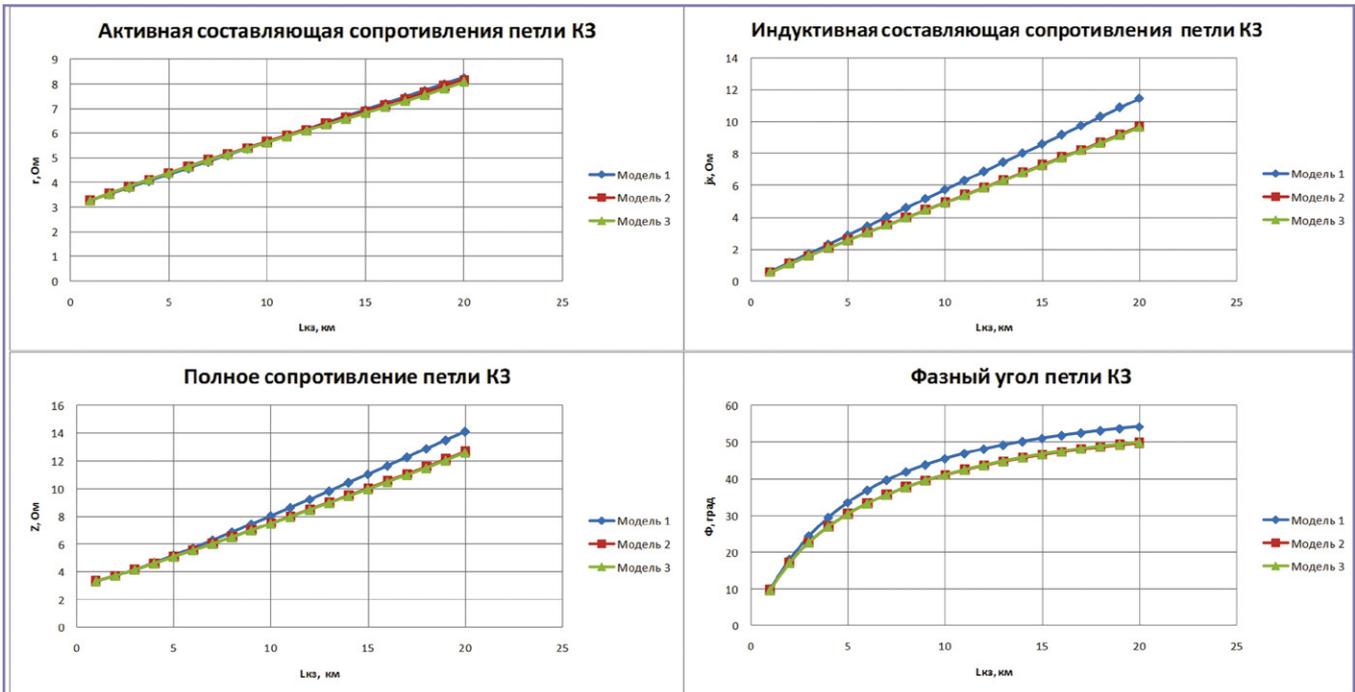


Рис. 3. Графики зависимости сопротивления петли короткого замыкания от расстояния до места КЗ.

В модели № 2 (рис. 1б) рельсовая цепь, переходное сопротивление и поверхность земли выполнены отдельными элементами. Элементы земли глубиной 10 м в дополнение к элементам рельсовой цепи и переходному

сопротивлению учитываются в модели № 3 (рис. 1в). На рис. 1 приняты следующие обозначения: ТП – тяговая подстанция; КЗ – место короткого замыкания; ЭК – уровень контактной сети; P – уровень рельсов; 3 – уровень

Для исследования проведена серия коротких замыканий через каждый километр тяговой сети. Результаты КЗ представлены в таблице 1 и на рисунках 2 и 3.

Результаты исследования показывают, что удельные сопротивления, полученные на модели № 1, как и следовало ожидать, не зависят от места КЗ. Численные значения этих сопротивлений хорошо согласуются со справочными данными [6] для средних значений сопротивлений. Данные моделей № 2 и № 3 не противоречат данным модели № 1, однако отличаются от них тенденцией к уменьшению величины удельного сопротивления по мере удаления места КЗ от подстанции.

На модели № 3, кроме анализа сопротивлений, проводились исследования распределения токов в рель-

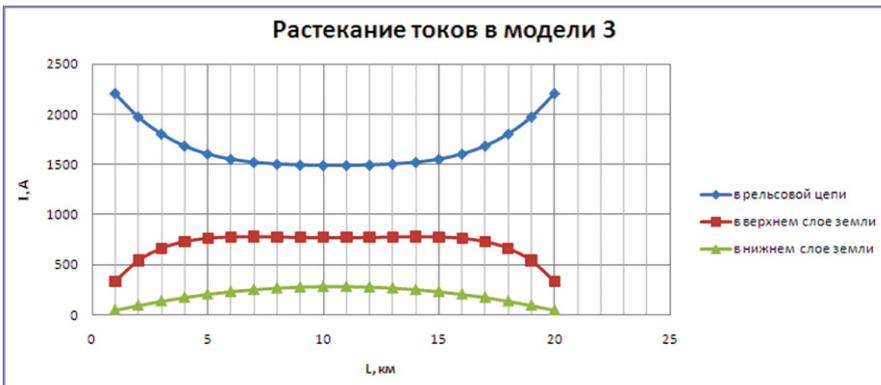


Рис. 4. Графики распределения токов в рельсах, в верхнем и нижнем слоях земли при коротком замыкании на 20 км.

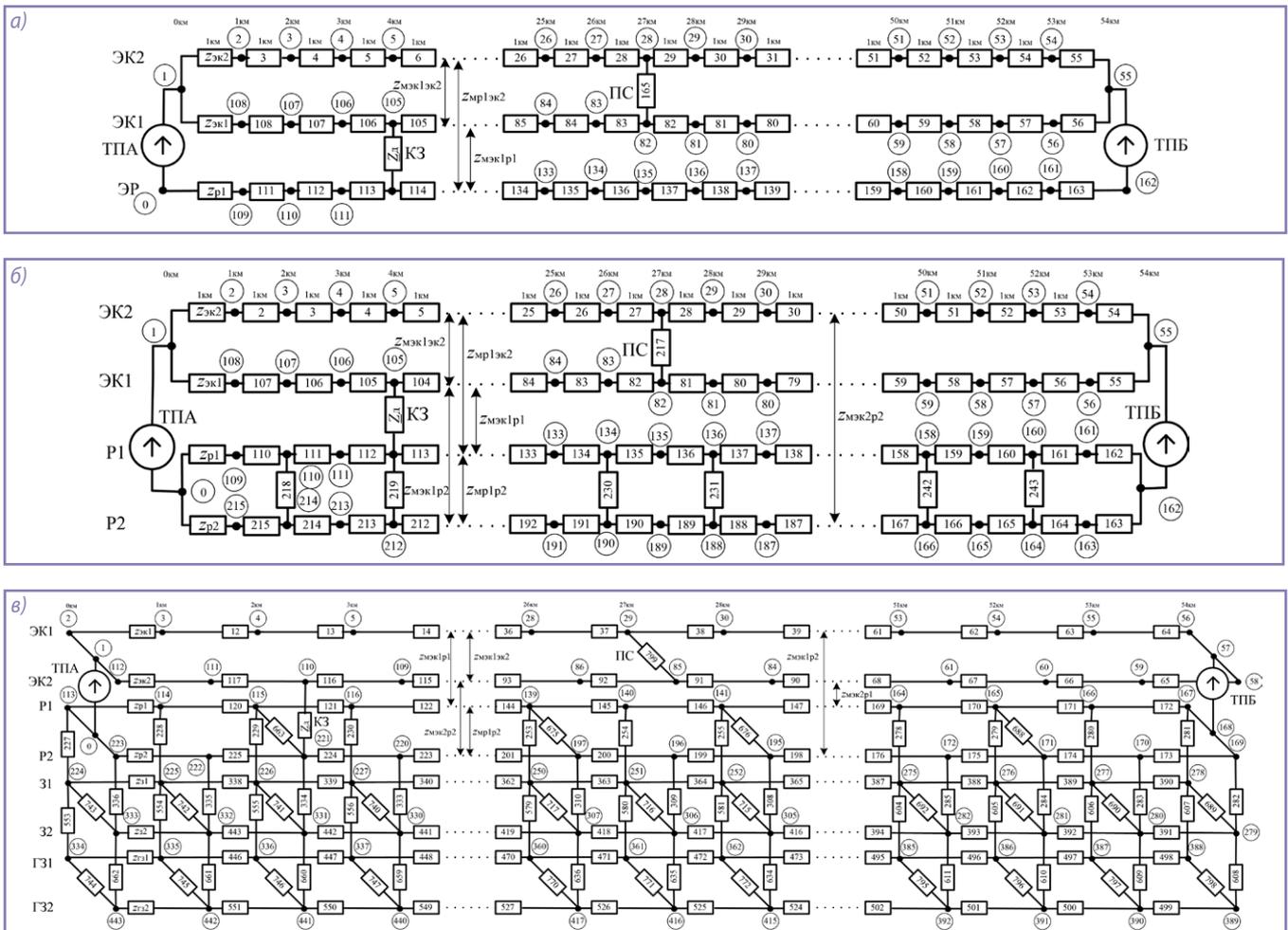


Рис. 5. Варианты моделей двухпутного участка с двусторонним питанием и постом секционирования:
а) модель № 4; б) модель № 5; в) модель № 6.

сах, на поверхности земли и в нижних слоях земли при коротком замыкании на 20 км. Результаты представлены на рис. 4.

Графики распределения токов, полученные при моделировании, примерно соответствуют результатам их аналитического исследования в работе [5]. В соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [7], графики распределения тока в рельсах могут быть использованы для уточнения сопротивления рельсов в зависимости от протекающих токов КЗ.

В существующих методиках рекомендуется рельсовые цепи двухпутного участка заменять одной эквивалентированной нитью. Представляет несомненный интерес исследование влияния детализации структуры рельсовых цепей в моделях двухпутных участков на удельные сопротивления и параметры петли КЗ.

Рассматриваются 3 варианта моделей (рис. 5) с двусторонним питанием и постом секционирования. Модель № 4 – это известная модель, в которой рельсы обоих путей эквивалентированы одной нитью [1, 5, 6]. В модели № 5 рельсы разделены и представлены на каждом пути самостоятельными элементами с междупутными и взаимоиндуктивными связями. Модель № 6 имеет элементы, имитирующие разделенные рельсовые цепи, балластную призму и землю с верхним и нижним слоями, связанными между собой. Короткие замыкания производились через каждый километр на участке от подстанции до поста секционирования, расположенного на 26 км.

На рис. 5 приняты следующие обозначения: $z_{эк1}$ – удельное собственное эквивалентное сопротивление контактной сети первого пути, Ом/км; $z_{эк2}$ – удельное собственное

эквивалентное сопротивление контактной сети второго пути, Ом/км; z_{p1} – удельное сопротивление рельсовой цепи первого пути, Ом/км; z_{p2} – удельное сопротивление рельсовой цепи второго пути, Ом/км; $z_{мэк1р1}$ – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной и рельсовой цепью первого пути, Ом/км; $z_{мэк1р2}$ – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью первого пути и рельсовой цепью второго пути, Ом/км; $z_{мэк1эк2}$ – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью первого и второго пути, Ом/км.

Сопротивления петли КЗ и удельные сопротивления тяговой сети, полученные по результатам моделирования КЗ, представлены в таблице 2 и на рис. 6, 7.

Представленные материалы наглядно показывают, что детализация элементов моделирования заметно влияет на удельные сопротивления

Таблица 2. Влияние степени детализации элементов рельсовой цепи на сопротивление петли КЗ, Ом.

Место КЗ, км	Модель № 4	Модель № 5	Модель № 6
1 км	3,01 + j0,89	3,33 + j0,53	3,34 + j0,52
10 км	5,09 + j6,02	6,4 + j4,97	6,39 + j4,56
26 км	7,12 + j16,83	17,49 + j16,31	17,13 + j14,38

и на параметры петли короткого замыкания.

Наибольшие расхождения удельных сопротивлений традиционной модели № 4 и моделей № 5, № 6 наблюдаются в средней части и по кра-

ям участка между подстанцией и постом секционирования.

Расхождение по параметрам петли короткого замыкания нарастает по мере приближения к посту секционирования. Моделирование глупо-

кой земли влияет лишь на численные значения удельных сопротивлений (рис. 5) и не создает существенных отличий параметров петель короткого замыкания (таблица 2 и рис. 6), полученных на моделях № 5 и № 6.

Выводы

1. При решении задач, связанных с определением места короткого замыкания, необходимо использовать модели с большей детализацией элементов тяговой сети.

2. Наибольший эффект дает детализация рельсовой цепи, переход-

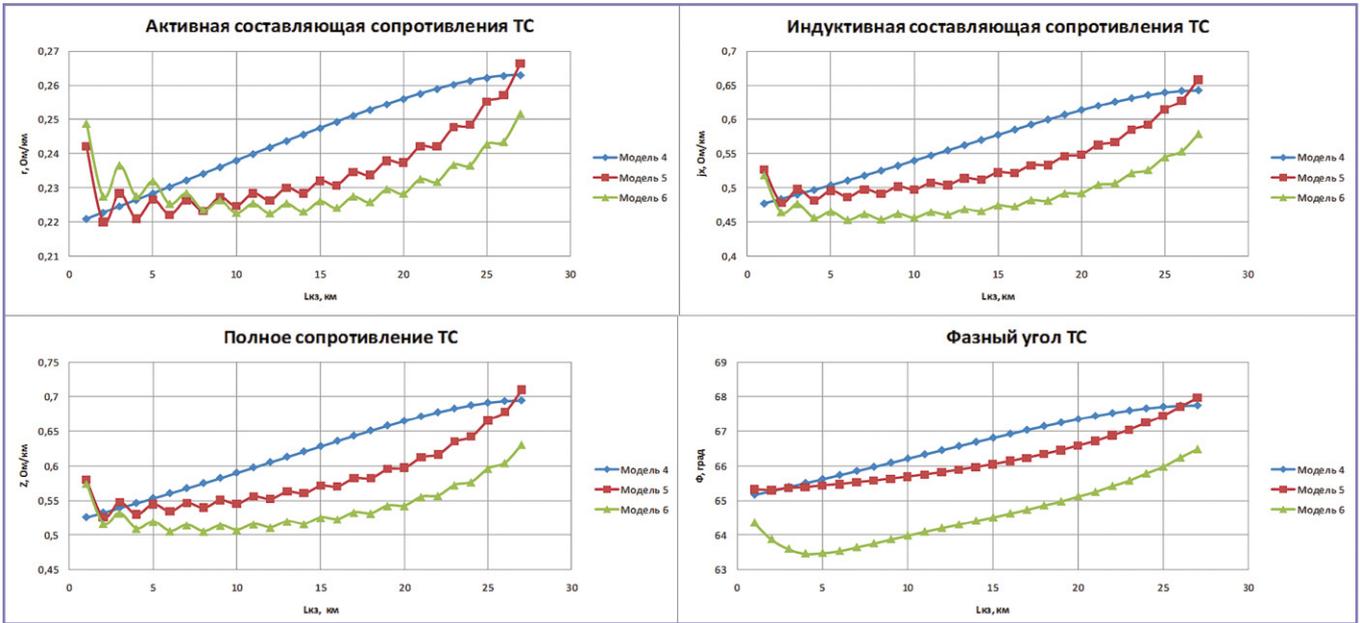


Рис. 6. Графики зависимости удельных сопротивлений тяговой сети и фазных углов от места КЗ.

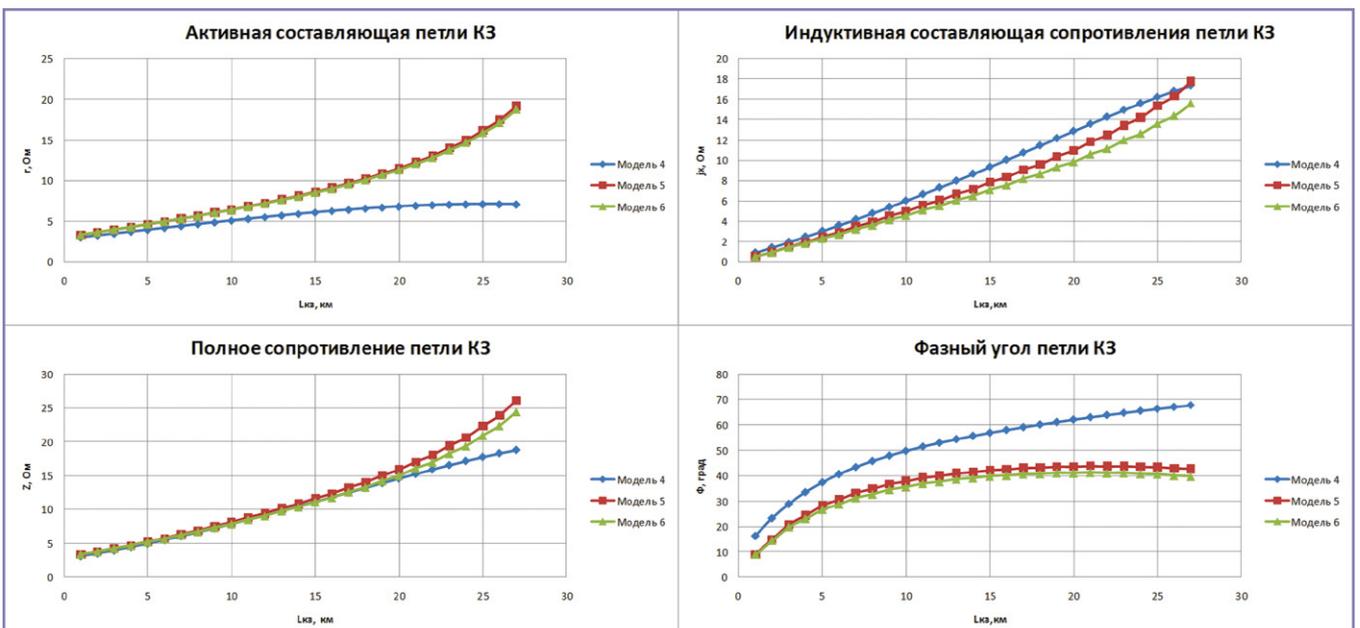


Рис. 7. Зависимости параметров петли КЗ от степени детализации модели и расстояния до места КЗ.

ного сопротивления и верхнего слоя земли.

3. Моделирование глубокой земли целесообразно в том случае, если требуется корректировка сопротивления рельсовой цепи по величине тока в рельсах.

4. Численные значения удельных сопротивлений и элементов петли короткого замыкания могут использоваться в качестве признаков в задачах определения места короткого замыкания в неоднородных тяговых сетях.

Литература:

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Учебник для вузов ж/д трансп. – М.: Транспорт, 1982. – 527 с.
2. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Учебник для вузов ж/д трансп. – М.: Желдориздат, 2002. – 720 с.
3. Марквардт К.Г., Быкадоров А.Л. Матричный метод расчета тяговых сетей. Труды РИИЖТа, вып. 132. Ростов-на-Дону, 1997.
4. Фигурнов Е.П. Сопротивления электротяговой сети однофазного переменного тока. Электричество, 1997, № 5, с. 23–29.
5. Карякин Р.Н. Тяговые сети переменного тока: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1987. – 279 с.
6. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1 / Под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
7. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на полное сопротивление петли короткого замыкания. Вестник транспорта Поволжья. Самарский гос. ун-т путей сообщения. – 2013. – № 5 (41). – С. 7–15. – «Пресса России» – 11886 ISSN.
8. Андреев В.В., Гречишников В.А., Шевлюгин М.В. Расчет интегральных показателей работы разветвленных систем тягового электроснабжения. Электротехника. – 2012. – № 12. С. 32–36. – Фирма Знак (Москва) – 0013–5860 ISSN.

Быкадоров Александр Леонович – в 1960 году окончил Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта. Доктор технических наук. В 1995 году защитил докторскую диссертацию на тему: «Теоретические основы прикладных задач управления режимами работы системы электроснабжения железных дорог для АСУЭ». В настоящее время является профессором кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» Ростовского государственного университета путей сообщения. Имеет более 115 печатных научных трудов. Область научных исследований – проблемы экономики электроэнергии, имитационное моделирование и компьютерные технологии в управлении электроснабжением в нормальных и вынужденных режимах работы. Имеет награды: орден «Знак почета», знак «Почетный железнодорожник».

Заруцкая Татьяна Алексеевна – родилась в 1975 году. В 1997 году окончила Ростовский государственный университет путей сообщения по специальности «Электроснабжение железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук. В 2004 году защитила диссертацию по теме: «Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции постоянного тока». Опыт работы – 17 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения». Имеет 45 научных работ, в том числе патенты.

Гаврилов Игорь Владимирович – родился в 1993 году. С 2011 года по настоящее время – студент ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по специальности «Электроснабжение железных дорог». Имеет 2 научные работы.

Муратова-Милехина Анна Сергеевна – родилась в 1987 году. В 2009 году окончила ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по специ-

альности «Электроснабжение железных дорог». С 2009 года по 2012 год обучалась в аспирантуре РГУПС. Имеет 8 научных работ. В настоящее время является сотрудником ОАО «Роствертол».

Bykadorov Aleksandr – graduated Rostov Institute of Railway Transport Engineers in 1960. He is a Doctor of Technical Sciences. In 1995 he has defended the dissertation by the theme: «Theoretical framework of application tasks of managing operating modes of the railways power supply system for the automated power metering system». At present, he holds the position of professor of department «Automated power supply system» of Rostov State Transport University. He is the author of over 115 printed research papers. His research focus covers power saving issues, simulation study and IT in managing power supply in standard and forced operating modes. He's been awarded with the Badge of Honor Order, the Badge of Honorary Railroader.

Zarutskaya Tatiana – was born in 1975. In 1997 she graduated Rostov State Transport University with the major in Railway Transport Power Supply. She is a candidate of Engineering Sciences. In 2004 she defended the dissertation by the theme: «Researching the efficiency of applying superconducting induction energy storage in DC traction substation». 17 years' work experience. At present, she holds the position of assistant professor of department «Automated power supply system» of Rostov State Transport University. She is the author of 45 research papers, including patents.

Gavrilov Igor – was born in 1993. Since 2011 and until present, he is a student of Rostov State Transport University with the major in Railways Power Supply. He has 2 research papers.

Muratova-Milehina Anna – was born in 1987. In 2009 she graduated Rostov State Transport University with the major in Railways Power Supply. Since 2009 until 2012, she had postgraduate training in Rostov State Transport University. She has 8 research papers. At present, she works at Rostvertol OJSC.

Энергетическая оценка эффективности рекуперации на электровозах переменного тока

// Energetic estimation of regenerative braking efficiency on AC electric locomotives //

Гарбузов И. И.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

В работе проведен сравнительный анализ результатов моделирования движения двух электровозов 2ЭС5К по типовому участку с холмистым профилем (тип III), регламентированному нормативными документами. При этом рассматривалась работа электровозов с применением рекуперативного торможения и без него – с использованием только пневматического. Были получены графики потребления активной, реактивной и полной энергий электровозами, а также их отдачи тяговыми подстанциями. На основании этих данных были вычислены удельные расходы энергии на тягу поездов, а также средневзвешенные коэффициенты мощности и реактивной мощности. Были проведены сравнение результатов моделирования и анализ влияния рекуперативного торможения на энергетику движения электровоза. Доказано, что применение рекуперативного торможения увеличивает потребление реактивной и полной энергий от тяговых подстанций, что приводит к росту потерь активной энергии в тяговой сети.

Ключевые слова: электровоз, тяга, рекуперативное торможение, фидерная зона, контактная сеть, математическое моделирование, вычислительный комплекс реального времени.

В настоящее время на электрических железных дорогах переменного тока широкое распространение получили электровозы с коллекторными электродвигателями и зонно-фазным регулированием напряжения на них. При их работе реализуется низкий коэффициент мощности, который в зависимости от нагрузки и удаления электровоза от тяговой подстанции находится в пределах 0,65–0,85. На Красноярской железной дороге, по обобщенным годовым данным, средний коэффициент мощ-

In that work was made the comparative analysis of results of modeling the motion of two electric locomotives 2ES5K on a site with a hilly profile (type III). That electric locomotives used regenerative braking and pneumatic only. As a result, we were obtained graphs consumption of active, reactive and apparent energy by electric locomotives, as well as their recoil by traction substations. Based on these data we calculated the specific energy consumption for traction, as well as the weighted average power factor and reactive power factor. Using that data, was made the comparison of simulation results and the analysis of regenerative braking influence on electric locomotives energetic. There are proved that the use of a regenerative braking are significantly increasing in the consumption of reactive power by electric locomotives and losses of active energy in the traction network.

Keywords: electric locomotive, traction, regenerative braking, feed zone, catenary, mathematical modeling, real-time computing complex.

ности (K_m) указанных электровозов составляет 0,795. По данным этой же дороги, а также в соответствии с результатами обширных экспериментов электровозы переменного тока типа ВЛ 80Р с рекуперативным торможением имеют еще более низкий коэффициент мощности: в режиме тяги – 0,705; в режиме рекуперации – 0,5175 [1]. Как видно из приведенных данных, при использовании рекуперативного торможения коэффициент мощности электровоза снижается на 26,6%. Низкие значения коэффициента мощности свидетельствуют о повышенном потреблении реактивной мощности, а также о появлении искажений напряжения и тока на токоприемнике электровоза. При этом в тяговой сети протекают реактивные токи, вызывающие дополнительные потери передаваемой энергии, что влечет увеличение расхода энергии на тягу поездов. Для подробного изучения влияния рекуперации на энергетические показатели качества электровозов было выполнено имитационное моделирование электро-

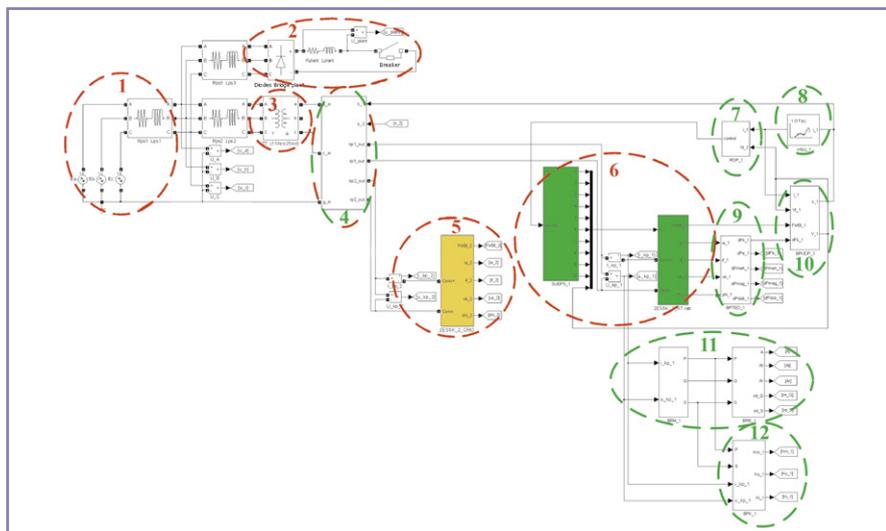


Рис. 1. Реализация имитационной модели СТЭС с движением электровозов в пакете Matlab/Simulink.

магнитных процессов на базе программно-аппаратного комплекса реального времени, созданного на кафедре «Электропоезда и локомотивы» МИИТа [2, 3].

Имитационная модель электрической железной дороги, разработанная в [2, 3], была реализована в пакете Matlab/Simulink (рис. 1). Она включает в себя модули электростанции (1), нетягового потребителя (2), тягового трансформатора подстанции (3), тяговой сети (4) и тяговых приводов электровозов (5 и 6). Кроме того, в состав модели входят новые блоки, разработанные специально для выполнения поставленной задачи. Это блок решения уравнения движения поезда (10), программный блок профиля пути (8), блок задания режима работы электровоза (7), блок расчета потерь в тяговых электродвигателях (9), блок учета активной, реактивной и полной мощностей, а также расхода электроэнергии на тягу поездов (11), блок-определитель показателей качества электрической энергии (12). Также для учета изменения параметров тяговой сети при движении электровозов блоки тяговой сети (4) были дополнены переменными сопротивлениями, а блоки системы первичного электроснабжения и тяговой подстанции продублированы для моделирования двухстороннего питания фидерной зоны длиной 50 км.

Для оценки эффективности применения рекуперативного торможения в системах тягового электроснабжения переменного тока было проведено два численных опыта по моделированию движения двух электровозов 2ЭС5К по тестовому участку электрической железной дороги.

Опыт 1. Движение электровозов 2ЭС5К с типовой силовой схемой по тестовому участку без применения рекуперативного торможения.

Опыт 2. Движение электровозов 2ЭС5К с типовой силовой схемой по тестовому участку с применением рекуперативного торможения.

Электровоз 1 следовал по первому пути с типовым профилем типа III (холмистого) в прямом направлении (A1) [4]. Электровоз 2 следовал ему навстречу по второму пути с типовым профилем типа III (холмистого) в обратном направлении (A2).

Длина тестового участка составила $l_{уч} = 144,9$ км, поэтому он был разбит на три фидерных зоны протяженностью $l_{фз1} = l_{фз2} = 50$ км и $l_{фз3} = 44,5$ км, соединенных друг с другом нейтральными вставками длиной $l_{нв} = 0,2$ км каждая.

В результате проведенных опытов были получены кривые расходов активной A_p , реактивной A_Q и полной A_S энергий на электровозах и тяговых подстанциях. Была проведена сравнительная оценка итоговых значений расхода энергии, удельных расходов активной энергии на тягу поездов, а также средневзвешенных значений коэффициентов мощности K_M^{cp} и коэффициентов реактивной мощности $tg\varphi^{cp}$

$$K_M^{cp} = \frac{\int_0^{t_1} P_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} P_2 dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} P_n dt}{\int_0^{t_1} S_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} S_2 dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} S_n dt} = \frac{A_p}{A_S} \quad (1)$$

где P_n – величина активной мощности электровоза в период времени $(t_n - t_{n-1})$;

S_n – величина полной мощности электровоза в период времени $(t_n - t_{n-1})$;
 $n = 1, 2, 3 \dots n$.

$$tg\varphi^{cp} = \frac{\int_0^{t_1} Q_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} Q_2 dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} Q_n dt}{\int_0^{t_1} P_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} P_2 dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} P_n dt} = \frac{A_Q}{A_p} \quad (2)$$

где Q_n – величина реактивной мощности электровоза в период времени $(t_n - t_{n-1})$.

На рис. 2а представлены графики расхода активной энергии на тягу поездов электровозами 1 (A_{p1}) и 2 (A_{p2}), суммарного расхода активной энергии на тяговых подстанциях $A_{Pn/cr}$, а также график потерь активной энергии в тяговой сети ΔA_p , вычисленные на основании алгебраического баланса активных мощностей в СТЭС.

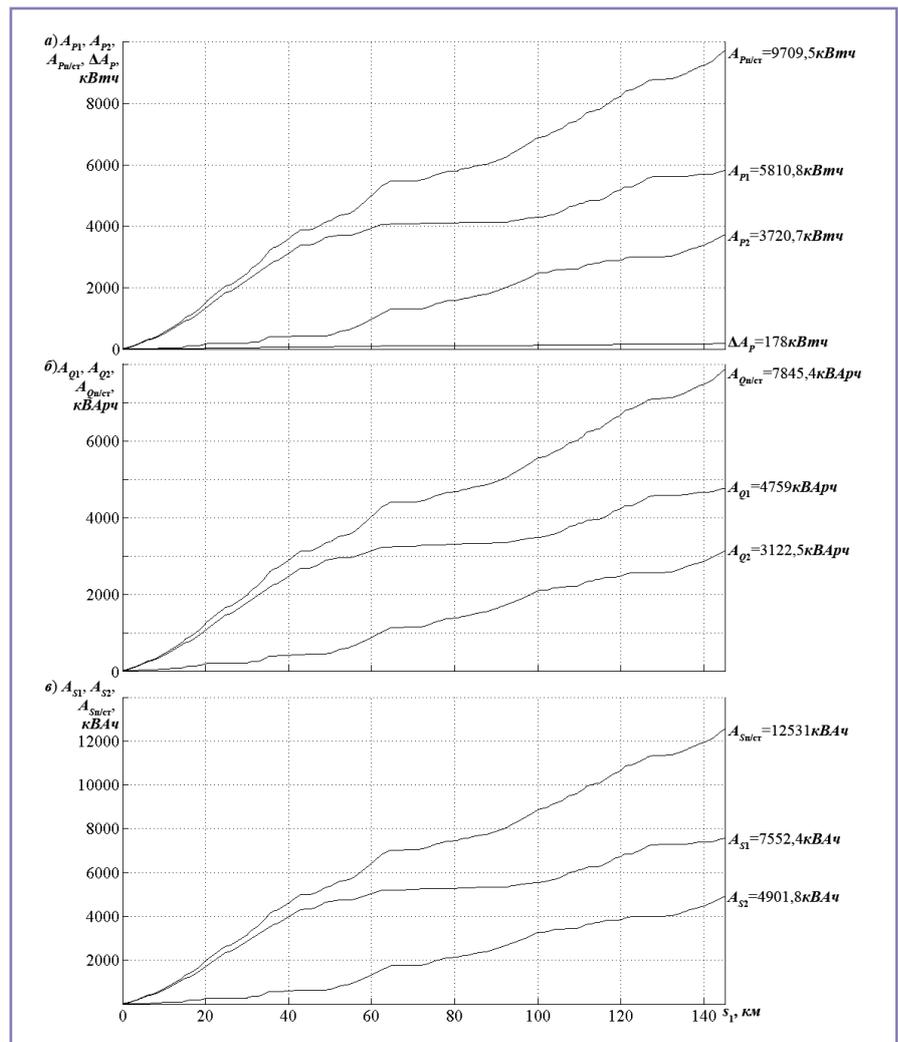


Рис. 2. Результаты моделирования движения электровозов в опыте 1: а – потребление активных энергий; б – потребление реактивных энергий; в – потребление полных энергий.

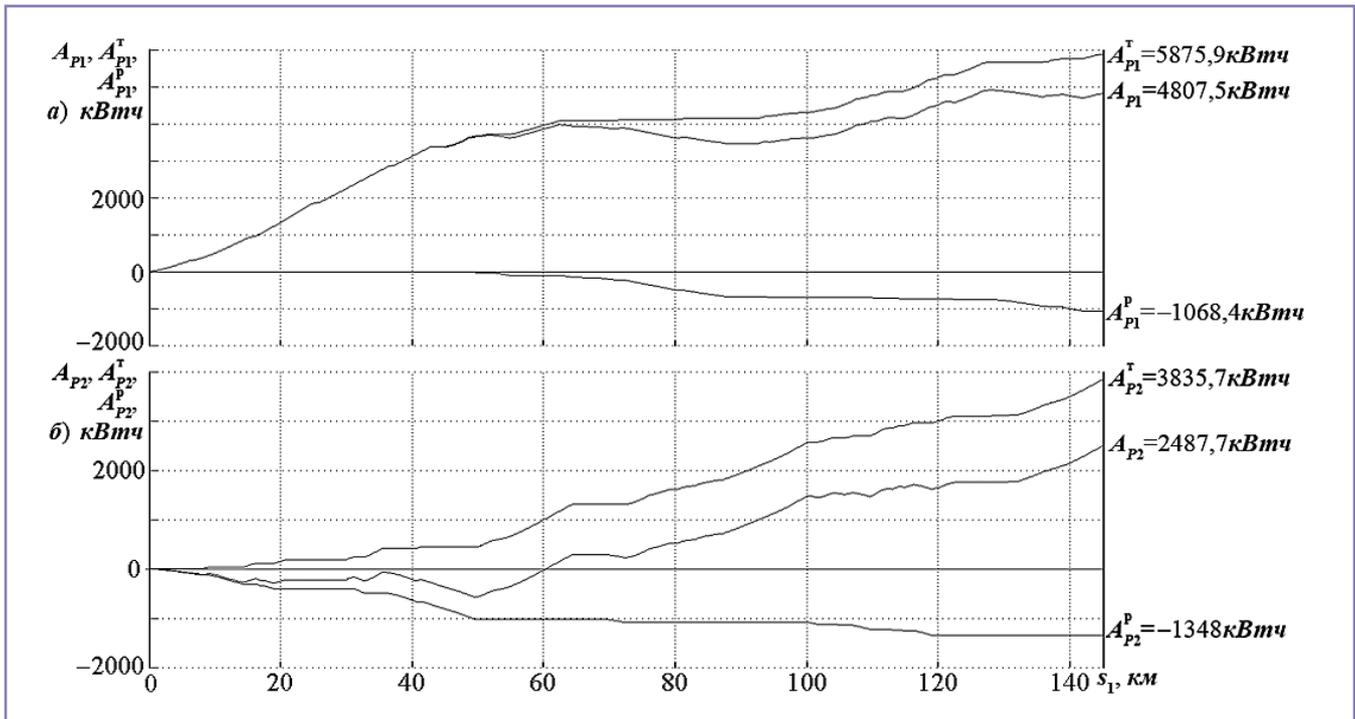


Рис. 3. Графики расхода активной энергии электровозами, а также расхода активной энергии на тягу поезда и отдачи активной энергии в сеть при рекуперативном торможении в опыте 2: а – электровозом 1; б – электровозом 2.

Из графика следует, что электровоз 1 израсходовал на ведение поезда по тестовому участку активную энергию $A_{P1} = 5810,8$ кВтч. Удельный расход электроэнергии на тягу поезда был вычислен по формуле

$$A_{P1}^{уд} = \frac{10^4 A_P}{(M_{л} + M_{п}) l_{уч}} \quad (3)$$

где $M_{л}$ – масса локомотива, т;

$M_{п}$ – масса поезда, т.

Для электровоза 1 удельный расход электроэнергии составил $A_{P1}^{уд} = 123,7$ кВтч/ (10^4 ткм брутто).

Электровоз 2 израсходовал активную энергию $A_{P2} = 3720,7$ кВтч. Это значение получилось меньше на 2090,1 кВтч, поскольку электровоз 2 не был постоянно подключен к тяговой сети, и некоторые участки с тяжелым профилем могли выпасть из рассмотрения. Соответственно, пройденный им путь будет меньше длины тестового участка $l_{уч}$. Удельный расход электроэнергии электровоза 2 составил $A_{P2}^{уд} = 85,7$ кВтч/ (10^4 ткм брутто).

Суммарный расход активной энергии на тяговых подстанциях составил $A_{P_{пн/ст}} = 9709,5$ кВтч, а удельный расход активной энергии составил $A_{P_{пн/ст}}^{уд} = 53,71$ кВтч/ (10^4 ткм брутто). Удельный расход активной энергии на тяговых подстанциях получился

меньше, чем на электровозах, потому что знаменатель выражения (3) увеличился почти в 4 раза, поскольку учитывались массы обоих поездов и расстояния, которые они преодолели, а числитель увеличился менее чем в 2 раза по сравнению с электровозом 1 и в 2,6 раза – по сравнению с электровозом 2.

Исходя из уравнения алгебраического баланса мощностей, потери активной энергии составили $\Delta A_P = 178$ кВтч. Эти потери составляют 1,83% от активной энергии $A_{P_{пн/ст}}$ потребляемой от тяговых подстанций.

На рис. 2б представлены графики расходов реактивных энергий на тягу поездов электровозами 1 (A_{Q1}) и 2 (A_{Q2}), а также суммарного расхода реактивной энергии на тяговых подстанциях $A_{Q_{пн/ст}}$.

Расход реактивной энергии на электровозе 1 составил $A_{Q1} = 4759$ кВАрч. Средневзвешенный коэффициент реактивной мощности, вычисленный по формуле (2), составил $\text{tg}\varphi_{P1}^{cp} = 0,819$.

Расход реактивной энергии на электровозе 2 составил $A_{Q2} = 3122,5$ кВАрч, что на 1636,5 кВАрч меньше, чем на электровозе 1. Его средневзвешенный коэффициент реактивной мощности был $\text{tg}\varphi_{P2}^{cp} = 0,839$, то есть на 0,02 выше, чем на

электровозе 1, что говорит о немного большем потреблении реактивной энергии.

Суммарный расход реактивной энергии на тяговых подстанциях составил $A_{Q_{пн/ст}} = 7845,4$ кВАрч, а средневзвешенный коэффициент реактивной мощности – $\text{tg}\varphi_{пн/ст}^{cp} = 0,808$.

На рис. 2в представлены графики расходов полных энергий на тягу поездов электровозами 1 (A_{S1}) и 2 (A_{S2}), а также суммарного расхода полной энергии на тяговых подстанциях $A_{S_{пн/ст}}$.

Расход полной энергии на электровозе 1 составил $A_{S1} = 7552,4$ кВАч. Средневзвешенный коэффициент мощности, вычисленный по (1), составил $K_{M1}^{cp} = 0,769$.

Расход полной энергии на электровозе 2 составил $A_{S2} = 4901,8$ кВАч, что на 2650,6 кВАч меньше, чем на электровозе 1. Его средневзвешенный коэффициент мощности был $K_{M2}^{cp} = 0,759$, то есть на 0,01 меньше, чем на электровозе 1, что также свидетельствует о немного большем потреблении реактивной энергии электровозом 2.

Суммарный расход полной энергии на тяговых подстанциях был $A_{S_{пн/ст}} = 12531$ кВАч. Средневзвешенный коэффициент мощности тяговых подстанций составил $K_{M_{пн/ст}}^{cp} = 0,775$. Он получился большим по тем же

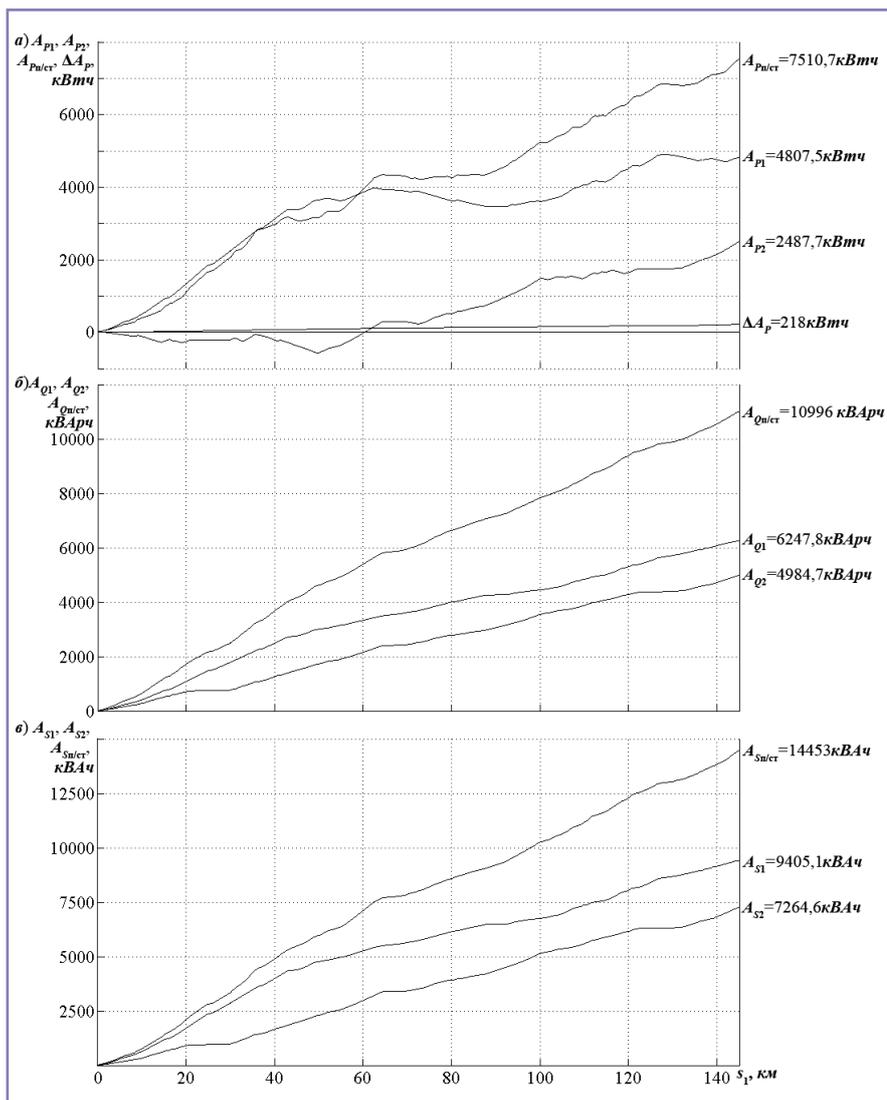


Рис. 4. Результаты моделирования движения электровозов в опыте 1: а – потребление активных энергий; б – потребление реактивных энергий; в – потребление полных энергий.

причинам, что и $A_{Pn/ct}^{уд}$ и $\text{tg}\varphi_{п/ст}^{ср}$.

Использование только пневматического торможения на холмистом профиле приводит к высокому удельному расходу активной энергии на тягу поездов – 123,7 кВтч/ (10^4 ткм брутто) на электровозе 1 и 85,7 кВтч/ (10^4 ткм брутто) на электровозе 2. Удельный расход активной энергии на тяговой подстанции при этом составил 53,71 кВтч/ (10^4 ткм брутто).

На рис. 3а представлен график расхода электровозом 1 активной энергии с отдельным учетом энергии, потраченной на тягу поезда A_{Pp}^T и энергии, возвращенной в сеть при работе в режиме рекуперативного торможения A_{Pp}^P . Расход активной энергии непосредственно в режиме тяги составил $A_{P1}^T = 5875,9$ кВтч, что на 65,1 кВтч больше, чем в опыте 1. Это превышение объясняется не-

большим расхождением в режимах движения поезда.

При работе в режиме рекуперативного торможения в тяговую сеть было возвращено $A_{P1}^P = 1068,4$ кВтч активной энергии. Эта энергия составляет 18,2% от энергии A_{P1}^T , затраченной в режиме тяги.

Благодаря применению рекуперативного торможения, расход активной энергии на ведение поезда электровозом 1 уменьшился на 1003,3 кВтч по сравнению с опытом 1, то есть до $A_{P1} = 4807,5$ кВтч. Удельный расход активной энергии на тягу поезда электровозом 1, вычисленный по формуле (1), также уменьшился на 21,4 кВтч/ (10^4 ткм брутто) до $A_{P1}^{уд} = 102,3$ кВтч/ (10^4 ткм брутто).

На рис. 3б представлен график расхода активной энергии электровозом 2 с применением отдельно-

го учета энергий A_{Pp}^T и A_{Pp}^P . Расход активной энергии непосредственно в режиме тяги составил $A_{P2}^T = 3835,7$ кВтч, что на 115 кВтч больше, чем в опыте 1, что также объясняется некоторыми различиями в режимах его движения. При работе в режиме рекуперативного торможения в тяговую сеть было возвращено $A_{P2}^T = 1348$ кВтч активной энергии. Эта энергия составляет 35,1% от затраченной в режиме тяги энергии A_{P2}^T . Такое заметное превышение объясняется непостоянной работой электровоза 2 на участке, выпадением из рассмотрения некоторых участков, преобладанием количества спусков над количеством подъемов. В связи с этим рекуперативное торможение использовалось интенсивнее, чем на электровозе 1.

Благодаря применению рекуперации, расход активной энергии электровозом 2 уменьшился на 634,8 кВтч, по сравнению с опытом 1, до $A_{P2} = 2487,7$ кВтч. Удельный расход активной энергии на тягу поезда также уменьшился на 26,9 кВтч/ (10^4 ткм брутто), по сравнению с опытом 1, до $A_{P2}^{уд} = 58,8$ кВтч/ (10^4 ткм брутто).

График суммарного расхода активной энергии на тяговых подстанциях $A_{Pn/ct}$, а также график потерь активной энергии в тяговой сети ΔA_p представлены на рис. 4а. Для наглядности там же продублированы графики расходов активной энергии электровозами 1 (A_{P1}) и 2 (A_{P2}). При применении рекуперативного торможения электровозами суммарный расход активной энергии на тяговых подстанциях уменьшился на 2208,8 кВтч, по сравнению с опытом 1, до $A_{Pn/ct} = 7510,7$ кВтч. Удельный расход активной энергии при этом уменьшился на 11,66 кВтч/ (10^4 ткм брутто) до $A_{Pn/ct}^{уд} = 42,05$ кВтч/ (10^4 ткм брутто). По сравнению с опытом 1 потери активной энергии в тяговой сети увеличились на 40 кВтч до $\Delta A_p = 218$ кВтч. Величина потерь ΔA_p составляет 2,9% от величины активной энергии $A_{Pn/ct}$, потребляемой от тяговых подстанций.

На рис. 4б представлены графики расходов реактивной энергии электровозами 1 (A_{Q1}) и 2 (A_{Q2}), а также суммарного расхода реактивной энергии на тяговых подстанциях $A_{Qn/ct}$.

При применении рекуперативного торможения расход реактивной энергии на электровозе 1 увеличился на 1488,8 кВАрч, по сравнению с опытом 1, до $A_{Q1} = 6247,8$ кВАрч. Применение рекуперации привело к увеличению средневзвешенного коэффициента реактивной мощности электровоза 1 на 0,081 до $\text{tg}\varphi_{p1}^{\text{cp}} = 0,9$.

При применении рекуперативного торможения расход реактивной энергии на электровозе 2 увеличился на 1862,2 кВАрч до $A_{Q2} = 4984,7$ кВАрч по сравнению с опытом 1. Такой прирост объясняется так же, как и большая величина отданной в режиме рекуперации активной энергии $A_{P2}^{\text{т}}$, поскольку в нем потребляется больше реактивной энергии A_{Q2} . Применение рекуперации привело к увеличению средневзвешенного коэффициента реактивной мощности электровоза на 0,121 до $\text{tg}\varphi_{p2}^{\text{cp}} = 0,96$.

При работе на участке электровозов с применением рекуперативного торможения суммарный расход реактивной энергии на тяговых подстанциях увеличился на 3150,6 кВАрч, по сравнению с опытом 1, до $A_{Qn/ct} = 10996$ кВАрч. Средневзвешенный коэффициент реактивной мощности при этом увеличился на 0,652 до $\text{tg}\varphi_{n/ct}^{\text{cp}} = 1,46$.

На рис. 4в представлены графики расходов полной энергии электровозами 1 (A_{S1}) и 2 (A_{S2}), а также суммарного расхода полной энергии на тяговых подстанциях $A_{Sn/ct}$.

При использовании рекуперации расход полной энергии на электровозе 1 увеличился на 1852,7 кВАч, по сравнению с опытом 1, до $A_{S1} = 9405,1$ кВАч. Применение рекуперации снизило средневзвешенный коэффициент мощности электровоза 1 на 0,031 до $K_{m1}^{\text{cp}} = 0,738$.

Применение рекуперации на электровозе 2 привело к увеличению расхода полной энергии на 2362,8 кВАч, по сравнению с опытом 1, до $A_{S2} = 7264,6$ кВАч. Его средне-

взвешенный коэффициент мощности снизился на 0,045 до $K_{m2}^{\text{cp}} = 0,714$, что свидетельствует о повышении потребления реактивной энергии по сравнению с предыдущим опытом.

В отличие от опыта 1 при работе на участке электровозов с применением рекуперативного торможения суммарный расход полной энергии на тяговых подстанциях увеличился на 1922 кВАч до $A_{Sn/ct} = 14453$ кВАч. Из-за уменьшения потребления от подстанций активной и повышения потребления реактивной и полной энергий средневзвешенный коэффициент мощности тяговых подстанций уменьшился на 32,9% и составил $K_{m n/ct}^{\text{cp}} = 0,52$.

В результате применения рекуперативного торможения на электровозах с зонно-фазным регулированием расход активной энергии на тяговых подстанциях $A_{Pn/ct}$ сокращается на 22,63%. Расходы активной энергии электровозами 1 и 2 уменьшились на 17,27% и 33,14% соответственно. Удельный расход активной энергии на тяговых подстанциях $A_{P n/ct}^{\text{уд}}$ сокращается на 21,71%, а на электровозах – на 17,3% и 31,4%. Отдаваемая электровозами 1 и 2 активная энергия $A_p^{\text{п}}$ составляет 18,2% и 35,1% от затрачиваемой ими на тягу $A_p^{\text{т}}$. Однако вместе с этим наблюдается существенный рост потребления реактивной энергии. Она увеличилась на 31,28% у электровоза 1, на 59,6% – у электровоза 2, на 40,16% – у тяговых подстанций. Полная энергия также увеличивается на 24,53% у электровоза 1, на 48,2% – у электровоза 2, на 15,34% – у тяговых подстанций. В результате снижаются коэффициенты мощности электровоза 1 – на 4%, электровоза 2 – на 5,9%, тяговых подстанций – на 32,9%. Потери активной энергии в тяговой сети увеличиваются на 22,5%.

Следовательно, применение рекуперативного торможения на ЭПС

с зонно-фазным регулированием при холмистом профиле пути может заметно снизить расход активной энергии на подстанциях, но негативно влияет на качество электроэнергии в СТЭС, энергетические показатели качества ЭПС, а также приводит к росту потерь активной энергии при передаче через тяговую сеть. Для улучшения энергетики СТЭС необходимо оборудовать электровозы устройствами компенсации реактивной мощности.

Литература:

1. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Духовников В.К. Управляемый компенсатор реактивной мощности электровоза // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 25–29.
2. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть–электровоз» // Электричество – 2002. № 2. – С. 29–35.
3. Савоськин А.Н., Болдин Д.И., Телегин М.В., Гарбузов И.И. Программно-аппаратный комплекс реального времени для имитационного моделирования электромагнитных процессов в электрических ж.д. переменного тока // Университетский научный журнал. – 2013. – № 5. – С. 113–119.
4. Методические указания по определению технико-экономической эффективности новых и усовершенствованных электровозов. – М.: Транспорт, 1986. – 115 с.

Гарбузов Илья Игоревич – родился в 1990 году. В 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электрический транспорт железных дорог». В настоящее время является аспирантом кафедры «Электропоезда и локомотивы» МГУПС (МИИТ). Имеет 16 научных работ.

Garbuzov Il'ya – was born in 1990. In 2012 he graduated from Moscow State of Railway University (MIIT) with a degree in «Electrical vehicles of Railways». At the present time he pursues postgraduate studies at «Electric trains and locomotives» department of MSURE (MIIT). He has 16 research papers.

О формировании программы совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжений

// The formation of program of joint calculation of traction and external power supply systems //

**Кишкурно К.В.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва**

Для совместного рассмотрения системы тягового электроснабжения (СТЭ) и системы внешнего электроснабжения (СВЭ) предложено использовать матрицу связи токов тяговой обмотки и токов тяговой сети. Получено выражение, которое поясняет формирование расчетных формул для всей системы тягового электроснабжения с учетом системы внешнего электроснабжения. Ключевые слова: система тягового электроснабжения (СТЭ), система внешнего электроснабжения (СВЭ), устройство регулирования напряжения под нагрузкой (УРПН), матрица связи токов, программа РАСТ-05К.

Регулирование потоков активной и реактивной мощностей в тяговой сети позволяет увеличить пропускную способность железной дороги, повысить эффективность работы электроподвижного состава и в целом системы тягового электроснабжения и снизить потери электроэнергии. Нормативный документ [1] устанавливает требования к регулированию параметров оборудования. В [1] указано, что подстанции с трансформаторами с регулированием напряжения под нагрузкой (УРПН) «... должны быть оборудованы устройствами автоматического регулирования», а также по установкам поперечной емкостной компенсации (КУ) указано: внедрение «плавного или, по крайней мере, ступенчатого автоматического регулирования мощности позволило бы оптимизировать напряжение в тяговой сети...».

В настоящее время повышается надежность УРПН, их ресурс доведен до 500 тыс. переключений, работают трансформаторы с УРПН на вакуумных камерах. Проектируются плавно регулируемые и ступенчато регулируемые установки попереч-

For joint consideration of traction power supply system (TPSS) with external power supply system (EPSS) is proposed to use a matrix of communication traction winding currents and currents traction network. Obtained an expression that explains the formation of calculation formulas for the entire system of the traction power supply system, taking into account the external power supply. Keywords: traction power supply system (TPSS), external power supply system (EPSS), on load tap changer (OLTC), matrix of currents communication, program RAST-05K.

ной емкостной компенсации (КУ) на отечественных железных дорогах. Включение установок поперечной и продольной емкостных компенсаций, вольтодобавочных и симметрирующих трансформаторов снижает уровень несимметрии напряжения на тяговых подстанциях.

Однако известны трудности регулирования напряжения в системе тягового электроснабжения переменного тока с наличием продольной и поперечной несимметрии ее параметров. Затруднено эффективное регулирование напряжения и реактивной мощности в связи с постоянно изменяющейся тяговой нагрузкой. И, наконец, в настоящее время применение указанных технических средств сдерживается отсутствием общепризнанных алгоритмов работы систем регулирования напряжения и реактивной мощности применительно к тяговому электроснабжению переменного тока. Соответственно, нет проектных решений по системам регулирования. Все это является одной из причин того, что практически на всех тяговых трансформаторах с УРПН автоматика ре-

гулирования напряжения выведена из работы. Поэтому необходимость разработки современной автоматики технических средств регулирования напряжения и реактивной мощности в тяговом электроснабжении переменного тока является актуальной задачей.

Для разработки современных технических средств эффективного регулирования необходимо уточнить расчетные формулы в схемах замещения тяговых трансформаторов контактной сети.

Цель статьи – оптимизировать механизм совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжений.

Необходимость совместного расчета СВЭ и СТЭ диктуется большой погрешностью традиционных упрощенных расчетов СТЭ без учета СВЭ, которая может достигать при определении напряжений, потерь мощности и уравнительного тока больших значений.

Большинство существующих методов расчета систем тягового электроснабжения (СТЭ), как правило, ориентированы на рассмотрение схем тяговой сети с питанием от тяговой подстанции, ограничиваясь шинами 110 (220) кВ [2, 3]. При этом связь между тяговыми подстанциями по сетям 110 (220) кВ отсутствует, то есть не учитываются взаимные сопротивления между тяговыми подстанциями. В наиболее распространенных методиках система внешнего электроснабжения в схеме замещения учитывается собственным узловым сопротивлением, рассчитанным по заданной мощности короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ тяговой подстанции [4]. Это вносит методические погрешности в расчеты [5].

Нагрузки на стороне тяговой обмотки I_a , I_b и I_c соединенные в «Треугольник», в общем случае включают

несимметричную тяговую нагрузку и трехфазную нагрузку нетяговых потребителей.

Токи в фазах тяговой обмотки

$$\begin{aligned} I'_a &= \frac{1}{3}(2I_a - I_b - I_c) \\ I'_b &= \frac{1}{3}(-I_a + 2I_b - I_c) \\ I'_c &= \frac{1}{3}(-I_a - I_b + 2I_c) \end{aligned} \quad (1)$$

Из (1) получаем матрицу связи токов с

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Получаем матрицу токов в обмотке трансформатора, соединенного в «Треугольник»

$$\mathbf{I}' = \frac{1}{3} \mathbf{c} \mathbf{I} \quad (3)$$

где \mathbf{I} – вектор-столбец токов тяговой сети и ДПР, соединенных в «Треугольник».

Для обоснования расчетных формул представим матрицу падений напряжения на вторичной стороне трехфазного трансформатора со схемой соединения «Звезда – треугольник» в системе 25 кВ [6] в виде

$$\Delta \mathbf{U} = \frac{1}{3} \mathbf{Z}_\Delta^\partial \mathbf{c} \mathbf{I} \quad (4)$$

где $\mathbf{Z}_\Delta^\partial$ – диагональная матрица сопротивлений фаз трансформатора в соединении «Треугольник»; \mathbf{c} – матрица связи токов тяговой обмотки и токов тяговой сети; \mathbf{I} – вектор-столбец токов тяговой сети и ДПР.

При эквивалентировании схемы трансформатора «Звезда – треугольник» в схему «Звезда – звезда» диагональная матрица сопротивлений фаз трансформатора равна

$$\mathbf{Z}_Y^\partial = \mathbf{Z}_\Delta^\partial / 3 \quad (5)$$

а матрица падений напряжения будет равна

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{Z}_Y^\partial \mathbf{c} \mathbf{I} \quad (6)$$

Потери мощности в трансформаторе будут иметь вид

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{1}{3} \mathbf{I}^{*T} \mathbf{c} \mathbf{Z}_\Delta^\partial \mathbf{c} \mathbf{I} = \\ &= \frac{1}{9} \mathbf{I}^{*T} \begin{bmatrix} 6\mathbf{Z}_\Delta & -3\mathbf{Z}_\Delta & -3\mathbf{Z}_\Delta \\ -3\mathbf{Z}_\Delta & 6\mathbf{Z}_\Delta & -3\mathbf{Z}_\Delta \\ -3\mathbf{Z}_\Delta & -3\mathbf{Z}_\Delta & 6\mathbf{Z}_\Delta \end{bmatrix} \mathbf{I} \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая (5), преобразуем (7)

$$\Delta P = \mathbf{I}^{*T} \begin{bmatrix} 2\mathbf{Z}_Y & -\mathbf{Z}_Y & -\mathbf{Z}_Y \\ -\mathbf{Z}_Y & 2\mathbf{Z}_Y & -\mathbf{Z}_Y \\ -\mathbf{Z}_Y & -\mathbf{Z}_Y & 2\mathbf{Z}_Y \end{bmatrix} \mathbf{I} \quad (8)$$

Введем обозначение

$$\mathbf{Z}_{0Y} = \begin{bmatrix} 2\mathbf{Z}_Y & -\mathbf{Z}_Y & -\mathbf{Z}_Y \\ -\mathbf{Z}_Y & 2\mathbf{Z}_Y & -\mathbf{Z}_Y \\ -\mathbf{Z}_Y & -\mathbf{Z}_Y & 2\mathbf{Z}_Y \end{bmatrix} \quad (9)$$

где \mathbf{Z}_{0Y} – тензор сопротивления трансформатора (по терминологии Г. Крона [7], при преобразовании схемы «Звезда – треугольник» в схему «Звезда – звезда» нагрузка соединена в «Треугольник»).

Тогда окончательно получим

$$\Delta P = \mathbf{I}^{*T} \mathbf{Z}_{0Y} \mathbf{I} \quad (10)$$

В таком виде представлены потери мощности в [7, 8] и использованы в программе PACT-05K [9].

Как пример покажем формирование матрицы падения напряжения для системы электроснабжения с двумя тяговыми подстанциями, для которой матрица узловых сопротивлений

$$\mathbf{Z}_Y = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix}$$

Представим матрицу падения напряжения в трехфазном исполнении с учетом блочно-диагональной матрицы \mathbf{C}

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{U} &= \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_{12} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_{12} \end{bmatrix} \cdot \\ &\cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{21} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_{21} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{22} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix} \cdot \\ &\cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1A} \\ \mathbf{I}_{1B} \\ \mathbf{I}_{1C} \\ \mathbf{I}_{2A} \\ \mathbf{I}_{2B} \\ \mathbf{I}_{2C} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

При расчете потерь мощности в трансформаторе учтем уравнивающие токи и коэффициенты трансформации трансформатора [6] и, подставив \mathbf{C} , получим

$$\Delta S_{Tp} = (\mathbf{I} + \mathbf{M} \mathbf{I}_Y)^T \mathbf{k}^\partial \mathbf{Z}_{0Y} \mathbf{k}^\partial (\mathbf{I} + \mathbf{M} \mathbf{I}_Y), \quad (12)$$

где \mathbf{I} – матрица комплексных значений токов нагрузки трансформаторов тяговых подстанций; \mathbf{I}_Y – сопряженное значение; \mathbf{I}_Y – матрица-столбец уравнивающих токов;

\mathbf{M} – первая матрица инцидентов подключения ветвей однофазной тяговой сети к трехфазным тяговым трансформаторам; $(\mathbf{I} + \mathbf{M} \mathbf{I}_Y)^T$ – транспонированная сумма сопряженных матриц-столбцов токов трехфазного трансформатора; \mathbf{k}^∂ – диагональная матрица коэффициентов трансформации трансформатора. Коэффициент трансформации равен отношению напряжений вторичной и первичной обмоток.

Полученное выражение (6) поясняет формирование расчетных формул для всей системы тягового электроснабжения с учетом системы внешнего электроснабжения.

Матрица уравнивающих токов заимствована из работ [2, 8] и является основополагающим элементом в формировании совместного расчета систем

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_Y &= \left(\mathbf{M}^T \mathbf{k}_0^\partial \mathbf{Z}_{0Y} \mathbf{k}_0^\partial \mathbf{M} + \mathbf{Z}_{mc} \right)^{-1} \\ &\times \mathbf{M}^T \left(\mathbf{k}_Y^\partial \mathbf{E} - \mathbf{k}^\partial \mathbf{Z}_0 \mathbf{k}^\partial \mathbf{I} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

где \mathbf{E} – матрица ЭДС; \mathbf{k}_0^∂ – коэффициент трансформации трансформатора для установившегося исходного режима; \mathbf{Z}_{mc} – сопротивление ветвей тяговой сети.

Все расчеты выполняются с введением значений всех параметров к напряжению 27,5 кВ. В соответствии с программой PACT-05K, окно с вводом исходных данных которой представлено на рис. 1, сеть внешнего электроснабжения может быть представлена сколь угодно сложной схемой и определяется матрицей узловых сопротивлений в фазных координатах размерностью 3N x 3N (где N – размерность исходной матрицы узловых сопротивлений), а матрица связи \mathbf{C} представлена блочно-диагональной матрицей, каждый блок которой соответствует (2).

В диалоговое окно программы PACT-05K вводятся значения параметров схемы замещения. В окне программы выбираем таблицу «Сопротивления СВЭ» и в соответствующие ячейки заносим комплексные значения сопротивлений ветвей СВЭ (действительная часть – в первый столбец, мнимая – во второй (рис. 1)). В этой же таблице расставляются номера узлов, к которым подсоединяются соответствующие ветви (начало этой ветви и ее конец).

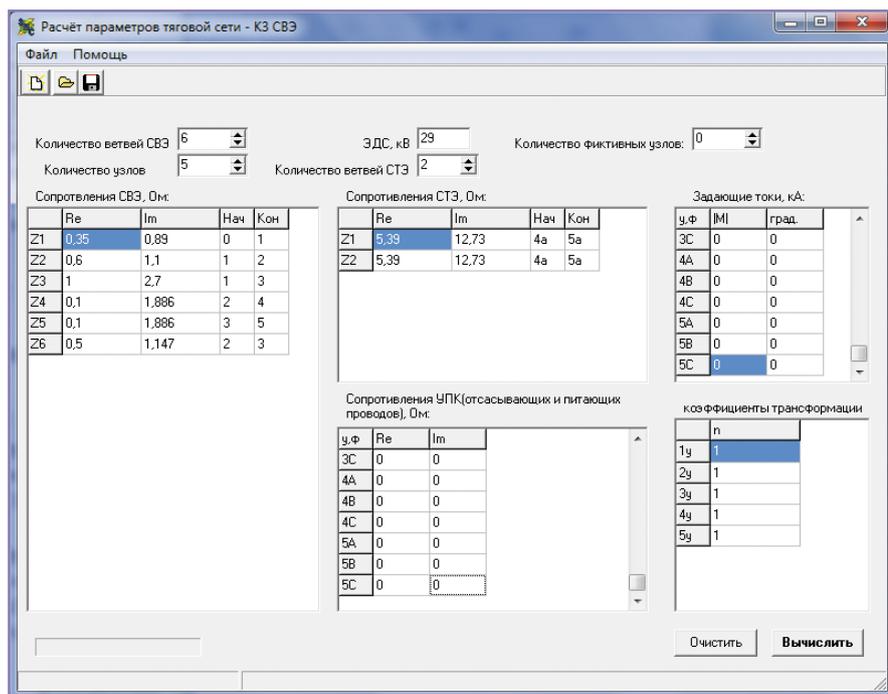


Рис. 1. Ввод исходных данных в программе РАСТ-05К.

Таблица сопротивлений СТЭ заполняется таким же образом, как и таблица сопротивлений СВЭ, за исключением номеров узлов: за номером узла следует буква, указывающая на то, к какой фазе данного узла подсоединена ветвь тяговой сети (например, начало 4а, конец 5а).

Коэффициенты трансформации задаются в относительных единицах, как отношение действительного коэффициента трансформации к номинальному. По умолчанию таблица заполнена значениями номинальных коэффициентов трансформации, равных 1 (рис. 1) [2].

Программа позволяет в любой точке тяговой и внешней сетей задать нагрузку по каждой фазе, поставив соответствующие значения в поле «Задающие токи»; установка поперечной емкостной компенсации формируется или задающим током, или сопротивлением; установка продольной емкостной компенсации задается емкостным сопротивлением.

В результате расчетов на выходе программы формируется матрица узловых сопротивлений системы электроснабжения, выводятся по фазам напряжения всех заданных узлов, а также данные о потерях мощности в СТЭ, в СВЭ и суммарные потери.

В программе приняты следующие допущения:

- не учитывается несинусоидальность тока и напряжения;
- трехфазные сети внешнего электроснабжения условно симметричные;
- зарядная мощность ЛЭП-110 (220) кВ учитывается в П-образной схеме замещения линии.

Потери холостого хода трансформатора реализуются путем подключения к первичной обмотке трансформатора активного и реактивного токов, рассчитанных по потерям активной и реактивной мощностей холостого хода трансформатора при номинальном напряжении. С целью уточнения целесообразно при расчете фактически напряжений трансформатора пересчитать потери холостого хода.

Выводы

1. Матрица связи **С** позволяет в расчетных матричных выражениях выделить вектор токов подстанции и выполнять с ним все дальнейшие преобразования.

2. С помощью применения матрицы связи **С** сформировано выражение потерь мощности для совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения с учетом уравнительного тока, установок поперечной и продольной компенсаций и регулирования напряжения трансформатора тяговой подстанции.

3. Совместные расчеты систем внешнего и тягового электроснабжения по определению токораспределения, режима напряжения, потерь и прироста потерь мощности с использованием матрицы связи токов **с** реализованы в программе на ЭВМ РАСТ-05К, зарегистрированной в ФИПС (Роспатент, свидетельство № 2014612195). Программа оценивает влияние системы внешнего электроснабжения на показатели режима тягового электроснабжения с продольной и поперечной несимметрией ее параметров.

Литература:

1. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. – М.: МПС – 1997. ЦЭ-462, 78 с.
2. Герман Л. А. Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения. Конспект лекций. (Ч. I – 1998, Ч. II – 2000) – М.: РГОТУПС.
3. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги». – М.: ТРАНСИЗДАТ, 2005. – 216 с.
4. Расчет пропускной способности электрифицированных железных дорог. Программа на ЭВМ. Свид. о гос. регистрации в Роспатенте № 2008615261 от 31.10.2008 г. Правообладатель – ОАО «РЖД». Автор – Марский В. Е.
5. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Вестник ВНИИЖТ, 2013, № 1, с. 16–21.
6. Автоматизация систем электроснабжения: учебник для вузов ж/д трансп. Под ред. Н. Д. Сухопрудского. – М.: Транспорт, 1990. – 359 с.
7. Крон Г. Тензорный анализ сетей. – М.: Сов. радио. 1978.
8. Герман Л. А., Морозов Д. А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. Уч. пособие. – М.: МИИТ, 2010, 59 с.
9. Свидетельство Роспатента РФ № 2014612195 от 28.10.13. о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения РАСТ-05К» / Герман Л. А., Попов Д. С., Кишкурно К. В.

Кишкурно Константин Вячеславович – родился в 1991 году. В 2012 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». В настоящее время является аспирантом кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения. Имеет 4 статьи, 1 патент.

Kishkurno Konstantin – was born in 1991. In 2012 he graduated from Moscow Institute of Transport Engineers (MIIT), speciality is «Railway roads power supply». At present he is an advanced student of «Electric railway roads power supply» chair of Moscow State Railway University. He has 4 articles, 1 patent.

Стендовые испытания тяговых электрических машин методом самоторможения

// Bench tests of traction electrical machines by the self-retardation method //

**Феоктистов В. П., д.т. н., профессор,
Литовченко В. В., к.т. н., доцент,
Чуверин Ю. Ю., к.т. н., доцент,
Назаров Д. В., Малютин А. Ю.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва**

Рассмотрен метод стендовых испытаний мощных электрических машин при обеспечении номинальной нагрузки в динамическом режиме. Метод рекомендован для использования на ремонтных заводах.

Ключевые слова: электрические машины, постоянный ток, испытания стендовые, электромеханические характеристики, метод самоторможения, тяговые двигатели, тепловозные генераторы.

Приемо-сдаточные испытания тяговых двигателей постоянного тока мощностью до 1000 кВт на электромашиностроительных и ремонтных предприятиях выполняют по методу взаимной нагрузки [1, 2]. При этом двигатели испытывают попарно, соединяя их валы муфтой, и при помощи вспомогательных машин малой мощности обеспечивают работу одного из них в двигательном режиме, а другого – в генераторном. Методика этих испытаний хорошо отработана, но зафиксированы и отдельные ее недостатки, а именно:

- в практике тягового электропривода широко используют мощные электрические машины одностороннего вращения, например, главные генераторы [3] тепловозов, у которых комплекты щеток установлены под острым углом по отношению к коллектору. При соединении двух таких машин одна из них будет вращаться в «неправильную» сторону, так что для испытаний такого генератора нужно использовать в качестве двигателя машину другого типа;

- тяговые двигатели тепловозов имеют мощность до 1200 кВт с двух-

The method of bench tests of powerful electrical machines when providing a rated load in the dynamic mode is considered. The method is recommended for use in repair plants.

Keywords: electrical machines, direct current, tests bench, electromechanical characteristics, self-retardation method, traction engines, diesel generators.

сторонней передачей вращающего момента, так что в условиях стенда на другую машину можно передать только половину максимально допустимого момента, что ограничивает диапазон нагрузочных испытаний;

- при испытаниях методом взаимной нагрузки на раму стенда, где закреплены двигатели, действует скручивающий момент рамной силы,

а на каждый двигатель – опрокидывающий момент, что требует создания массивной металлоемкой конструкции и сложной трудоемкой системы крепления каждого двигателя на раме;

- соединение валов испытуемых двигателей между собой при помощи муфты требует соблюдения жестких требований по соосности; иначе радиальные биения

вызывают недопустимые вибрации всего стенда и искажают результаты испытаний.

Этих недостатков можно избежать, если использовать другой метод испытаний, а именно метод самоторможения, который пока применяют только для определения механических потерь путем замера процесса замедления испытуемой машины на выбеге [4]. Но этот метод можно использовать и для определения параметров электромеханических характеристик при приемо-сдаточных испытаниях. Обычно требуется контроль только параметров номинального режима: частоты вращения $n_{\text{ном}}$, напряжения $U_{\text{ном}}$ и тока $I_{\text{ном}}$, а для машин с независимым возбуждением, кроме того, магнитного потока $\Phi_{\text{ном}}$ или тока возбуждения $I_{\text{в-ном}}$. Эти параметры указаны в техническом паспорте машины вместе с допусками на них. Наиболее массовыми являются приемо-сдаточные испытания на ремонтных предприятиях. При этом вполне достаточно контроля по точке номинального режима, что позво-

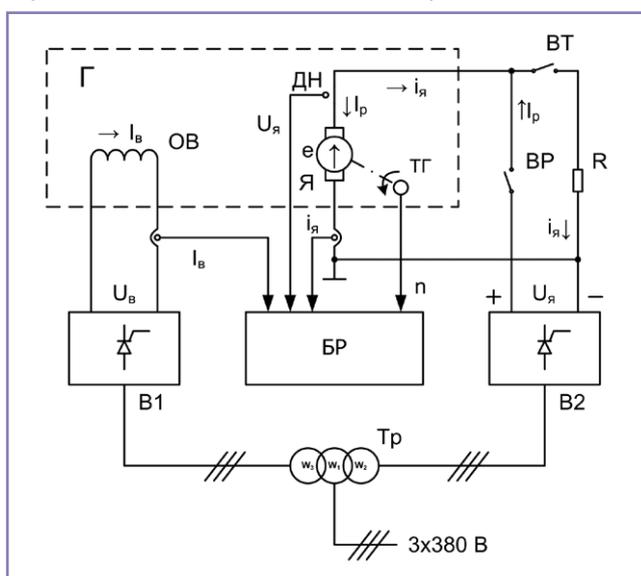


Рис. 1. Схема испытательного стенда.

ляет выявить ошибки технологии ремонта, определить качество сборки, например, монтажа полюсов, щеткодержателей, зазоры в подшипниках и в магнитной системе машины, в том числе эксцентриситет.

Указанный контроль предложено реализовывать в схеме стенда по рис. 1, где в качестве примера показан тепловозный генератор Г, то есть машина постоянного тока с независимым возбуждением. На стенде его обмотку возбуждения ОВ питают от низковольтного выпрямителя В1, устанавливая номинальное значение тока возбуждения $I_{\text{В}}$. Далее реализуют разгон испытуемой машины, подключая к ее якорной обмотке Я источник напряжения – выпрямитель В2 – путем замыкания выключателя ВР (при отключенном выключателе ВТ). При этом происходит разгон машины Г на холостом ходу до повышенной частоты вращения $n_{\sim 0}$, которая должна быть несколько выше номинальной, то есть

$$n_{\sim 0} = (1,1 \div 1,2)n_{\text{н}} \quad (1)$$

Для этого необходимо напряжение $U_{\text{я0}}$ близкое к номинальному напряжению генератора

$$U_{\text{я0}} = e_0 + I_{\text{я0}} r_{\text{я}} = c\Phi_{\text{н}} n_0 + I_{\text{я0}} r_{\text{я}} \quad (2)$$

где e_0 – ЭДС в якорной обмотке, $r_{\text{я}}$ – активное сопротивление якорной обмотки.

Но при этом ток $I_{\text{я0}}$ в рассматриваемом режиме разгона не превышает 3–4% от номинального значения тока машины; он должен соответствовать потерям холостого хода. Таким образом, стенд не потребляет из силовой сети значительной мощности. При испытаниях генераторов мощностью 3 МВт из трехфазной сети 3 x 380 В через трансформатор $T_{\text{р}}$ потребляется не более 35 кВт. Блок регистрации показаний датчиков напряжения ДН и тока ДТ, а также тахогенератора ТГ подключен к однофазной сети 220 В. В качестве БР используют персональный компьютер с типовой программой EXPERIMENT.

Действия, рассмотренные выше, относятся к подготовительному этапу испытаний.

Основной этап рассматриваемых испытаний начинается, когда частота вращения машины превышает но-

минальную, то есть $n_0 > n_{\text{н}}$ и $\Phi = \Phi_{\text{н}}$. Для реализации этого этапа выключают контактор ВР и выключают ВТ, образуя контур реостатного торможения с гашением кинематической энергии вращающейся машины. Процесс замедления описывается уравнениями [5]

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = -M = -(c\Phi) i_{\text{я}} \\ e = (c\Phi) n \\ U = e - i_{\text{я}} r_{\text{я}} + I_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

где $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ – угловая частота вращения, рад/с; M – вращающий момент; e – ЭДС; $r_{\text{я}}$, $I_{\text{я}}$ – активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря.

Поскольку цель испытаний заключается в проверке точки номинального режима

$$n_{\text{н}}; U_{\text{н}}; I_{\text{н}}; \quad (4)$$

то в соответствии с параметрами этой точки сопротивление реостата должно быть

$$R = \frac{U_{\text{н}} + \Delta U_{\text{д}}}{I_{\text{н}}} \quad (5)$$

где $\Delta U_{\text{д}}$ – динамическая добавка к выходному напряжению $U_{\text{н}}$, обусловленная динамикой переходного процесса, что отражено в последнем уравнении системы (3).

Исходя из указанного, выходное напряжение генератора в точке номинального режима фактически должно быть

$$U_{\text{н}}^* = U_{\text{н}} + \Delta U_{\text{д}} = U_{\text{н}} + \left| I_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} \right| \quad (6)$$

где величину отрицательной производной от кривой $i_{\text{я}}(t)$ при $n = n_{\text{н}}$ вычисляют при помощи блока регистрации БР. Хотя это вычисление добавки можно выполнить заранее путем решения системы уравнений (3) для конкретного типа испытуемых машин, но экспериментальным путем это сделать проще.

Изменение контролируемых параметров (4) в процессе самоторможения испытуемой машины осуществляют по кривым, показанным на рис. 2. Конкретно при $n = n_{\text{н}}$ блок БР регистрирует значения напряжения $U_{\text{я}}(t_{\text{н}})$, $i_{\text{я}}(t_{\text{н}})$, а также определяет производную $\frac{di_{\text{я}}}{dt}$ в точке $t = t_{\text{н}}$. Для определения истинного значения входного напряжения в точке статического номинального режима необходимо выполнить вычисление генерируемого напряжения по формуле

$$U_{\text{СТ}} = u_{\text{я}}(t_{\text{н}}) + I_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} \quad (7)$$

которая аналогична ранее приведенной формуле (6). Таким образом определяют три базовые точки (4), характеризующие номинальный режим испытуемой машины. Формула (7) позволяет исключить неточность, возникающую из-за динамического режима; при этом важно, что испытания проводятся в генераторном режиме при постоянном магнитном потоке.

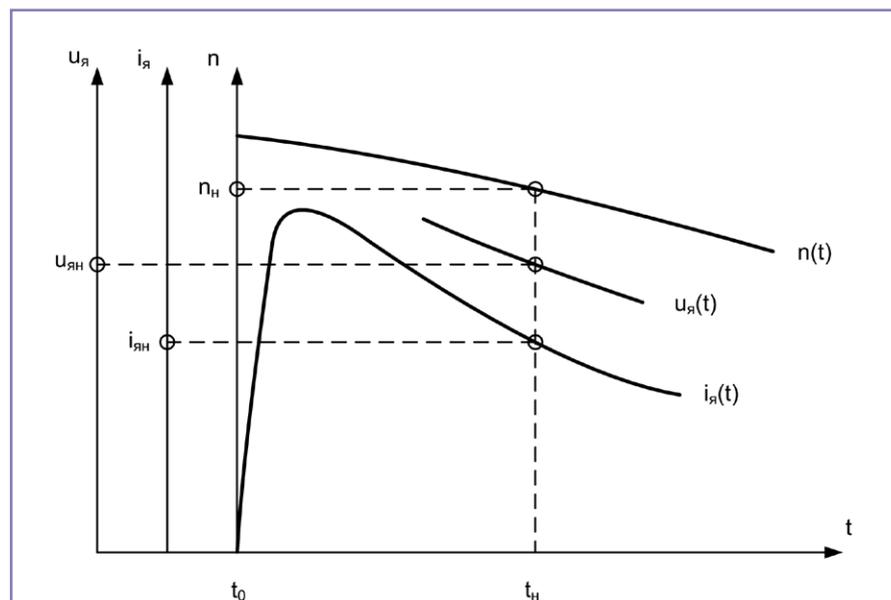


Рис. 2. Изменение частоты вращения n , напряжения $U_{\text{я}}$ и тока $i_{\text{я}}$ в процессе самоторможения.

Аналогичным образом испытания тяговых двигателей тоже нужно проводить при независимом возбуждении, устанавливая ток возбуждения равным номинальному. При необходимости полученные параметры могут быть пересчитаны на двигательный режим с учетом сопротивления обмоток.

Выводы

1. Метод самоторможения позволяет выполнять экспресс-контроль мощных электрических машин постоянного тока с определением параметров электромеханических характеристик в номинальном режиме.

2. Метод самоторможения рекомендуется для тепловозных генераторов, которые не могут быть испытаны на типовом стенде методом взаимной нагрузки.

Литература:

1. ГОСТ 11828–86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.
2. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоиздат, 4-е изд., 1984, 408 с.
3. Рудая К.И. Электрическое оборудование тепловозов. М.: Транспорт, 5-е изд., 1981, 287 с.
4. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. М.: Издательство Академия, 2004, 384 с.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001, 381 с.

Феоктистов Валерий Павлович – родился в 1939 году. В 1961 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). Доктор технических наук, профессор. В 1982 году защитил диссертацию по теме: «Управление режимами электропоез-

дов с импульсным регулированием». Опыт работы – 49 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электропоезда и локомотивы» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). Заслуженный работник Высшей школы. Имеет 4 монографии (в соавторстве), свыше 100 авторских свидетельств и патентов, более 300 научных трудов.

Литовченко Виктор Васильевич – выпускник Московского института инженеров транспорта (1969 год, специальность «Электровозостроение»). В 1974 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование электромагнитных процессов в силовых цепях электроподвижного состава переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями». Кандидат технических наук. В настоящее время является доцентом кафедры «Электропоезда и локомотивы» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Чуверин Юрий Юрьевич – родился в 1945 году. В 1967 году окончил МИИТ. Кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Назаров Дмитрий Валерьевич – родился в 1988 году. В 2012 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электрический транспорт железных дорог». В настоящее время работает инженером 1-й категории и учится в аспирантуре МГУПС (МИИТ).

Малютин Артём Юрьевич – родился в 1991 году. В 2013 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электрический транспорт железных дорог». В настоящее время является аспирантом Москов-

ского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Feoktistov Valeriy – was born in 1939. In 1961 he graduated from Moscow State Railway University (MIIT). He is a Doctor of Engineering, professor. In 1982 he defended the thesis on the topic: «Control of modes of electric trains with pulse regulation». Work experience is 49 years. At present he works as a professor of «Electrical trains and locomotives» chair of Moscow State Railway University (MIIT). He is an honoured worker of higher school. He has 4 monographs (co-authorship), more than 100 author's certificates and patents, more than 300 scientific works.

Litovchenko Viktor – graduate of Moscow State Institute of Transport Engineers (1969, speciality «Building of locomotives»). Since 1974 is Ph. D. in technical sciences with the dissertation paper: «Electromagnetic processes research in power circuits of AC tractive electric rolling stock with asynchronous traction drive». Now is an associate professor of the chair «EMUs and locomotives» of Moscow State Railway University (MIIT).

Chuverin Yuri – was born in 1945. In 1967 he graduated from the MIIT. Associate Professor, Ph. D., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Nazarov Dmitriy – was born in 1988. In 2012 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with specialization in «Electrical transport of rail roads». At present he works as a first category engineer and pursues postgraduate studies in MSURE (MIIT).

Malyutin Artyom – was born in 1991. Graduated from Moscow State Railway University (MIIT) with speciality «Electric transport of railways» in 2013. Now is being a postgraduate student if of Moscow State Railway University (MIIT).

Производство водорода с помощью систем рекуперации энергии на борту транспортного средства

// Hydrogen production using energy recovery systems on board the vehicle //

Овсянников Е. М., д.т. н., профессор,

Клюкин П. Н., к.т. н.,

МГТУ «МАМИ», г. Москва

Акимов А. В.,

ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва

В данной работе рассмотрены научные исследования и проведенные эксперименты по применению водорода на транспорте с целью повышения энергоэффективности двигателей внутреннего сгорания. Предлагаются модель установки электрохимического генератора водорода на борту транспортного средства и технические меры для коррекции алгоритма системы управления двигателем.

Ключевые слова: системы регенерации энергии, электролизер, гидроксигаз.

In this article different scientific-research works and conducted experiments on application of oxyhydrogen gas on the board of transport vehicles with the purpose to improve the internal combustion engines efficiency and reduce fuel consumption were considered. A model of electrochemical hydrogen generator installation on the vehicle's board and technical measures for the correction control algorithm are suggested.

Keywords: energy regeneration systems, electrolyzer, oxyhydrogen.

Потребность в увеличении мощности двигателей внутреннего сгорания и снижении выбросов токсичных веществ в составе отработавших газов предопределила развитие систем рекуперации энергии на транспорте. В настоящее время практически все системы рекуперации энергии на транспорте вырабатывают электрическую энергию, которую используют для повышения энергоэффективности силовых агрегатов транспортных средств. Наиболее эффективными и экономически оправданными системами регенерации энергии на транспорте являются [7]:

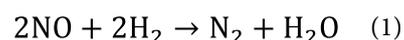
- система рекуперации энергии торможения (KERS);
- система регенерации тепловой энергии в системе выпуска отработавших газов по циклу Ранкина (Rankine cycle);
- система регенерации кинетической энергии (турбоэлектрогенератор) в системе выпуска отработавших газов;
- термоэлектрический генератор на эффекте Зеебека (Seebeck effect).

В условиях рыночной экономики и высокой конкуренции среди автопроизводителей необходимы новые технические решения и предложения по применению электрической энергии, получаемой вследствие рекуперации энергии на транспорте. Они должны соответствовать высоким стандартам качества технического исполнения и безопасности эксплуатации, а также рентабельности применения на транспорте.

Одним из наиболее перспективных направлений является производство (на борту транспортного средства) и применение водорода, а также химических газовых соединений на его основе в качестве топлива или добавки к топливно-воздушной смеси, подаваемой в камеры сгорания ДВС.

Ожидаемая эффективность от применения водорода объясняется высоким значением его удельной теплоты сгорания (120 МДж/кг) среди веществ, использующихся в качестве энергоносителей и применяющихся на настоящий момент времени. Для сравнения удельная теплота сгора-

ния бензина и дизельного топлива составляет 42–44 МДж/кг, а метана – 50 МДж/кг, то есть более чем в два раза меньше, чем у водорода. Такой показатель, как удельная теплота сгорания, влияет на удельный расход топлива, тем самым дает возможность увеличить энерго-мощностные характеристики двигателя внутреннего сгорания. Помимо этого, водород является активатором снижения выбросов NO_x в составе отработавших газов, что немаловажно при текущем ужесточении экологических стандартов, регулирующих содержание вредных веществ в составе отработавших газов. Так, например, было установлено положительное влияние водорода на процессы окисления и выделения сажи в дизельных двигателях. Наличие водорода в зоне реакции и горения топливно-воздушной смеси сопровождается окислительно-восстановительными реакциями азота [9]



Необходимо также отметить, что, по результатам проведенных исследований [10], наряду со снижением выбросов NO_x при порционной добавке продуктов конверсии метанола ~10% (с содержанием водорода ~1,25%) в топливно-воздушную смесь дизельного двигателя наблюдалось снижение содержания сажи в составе отработавших газов на 45% во всем диапазоне нагрузочных режимов дизельного двигателя.

В связи с вышеизложенным водород по праву считается одним из наиболее перспективных энергоносителей для масштабного использования на транспортных средствах, однако существует ряд проблем, которые необходимо отметить:

- отсутствие развитой инфраструктуры для хранения водорода

с целью дозаправки транспортных средств, использующих водород в качестве топлива;

- относительно высокая стоимость производства чистого водорода;
- неблагоприятное воздействие на окружающую среду производственных мощностей, производящих чистый водород, ввиду использования технологии паровой конверсии природного газа или нефтяных фракций;
- высокие требования по безопасности к техническому исполнению оборудования для перевозки, хранения и подачи водорода в камеры сгорания ДВС.

Одной из первых в области применения водородной энергетики на транспорте была и остается компания BMW со своей разработкой битопливного автомобиля BMW Hydrogen 7. Необходимо отметить весомый вклад инженеров в этой области. Именно компания BMW наглядно показала своим проектом Clean Energy, что современных технологических возможностей более чем достаточно для реализации таких перспективных задач по замещению углеводородного топлива. К сожалению, проект оказался весьма дорогостоящим ввиду перечисленных выше проблем и в серийное производство не был запущен. Одна-

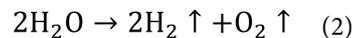
ко он дал старт новым инженерным решениям, которыми занялись по всему миру, что подтверждает большое количество патентной документации по этой тематике.

Изучив опыт западных автопроизводителей и научных центров, можно привести перечень первоочередных мер, необходимых для реализации применения водорода на транспорте:

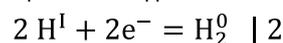
- замещение газобаллонного оборудования для хранения и перевозки водородного топлива на борту транспортного средства на оборудование, способное производить водород на борту транспортного средства;
- прямая подача водорода во впускной коллектор или камеры сгорания ДВС, исключая наличие емкостей для его хранения, за исключением фильтров тонкой очистки.

Этим требованиям удовлетворяет метод производства водородной смеси посредством электрохимического преобразования воды, то есть электролиза воды. Суть данного метода заключается в протекании окислительно-восстановительных реакций на электродах, погруженных в электролит (воду или химический раствор), при протекании через них постоянного электрического тока. При этом данный электрохимический процесс сопрово-

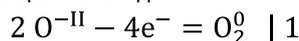
ждается выделением кислорода O_2 на аноде и водорода H_2 – на катоде. Таким образом, на выходе мы имеем смесь газов в соотношении 2:1, то есть 2 атома водорода к одному атому кислорода. Ниже (2) приведена химическая формула данного процесса.



Реакция на катоде:



Реакция на аноде:



В целях обеспечения необходимой производительности (газо-выделения) пластины разной полярности собираются в отдельные кассеты и соединяются последовательно, при этом учитываются их полярность, покрытие и габаритные размеры. Такое устройство в сборе и представляет собой электролизер. Электролит для электролизера представляет собой разбавленную высококонцентрированную щелочь (как правило, гидроксид натрия NaOH) в водном растворе. Для большей производительности электролизера, работы в различных температурных диапазонах с учетом специфических особенностей местности концентрация щелочи в электролите поддерживается в определенном

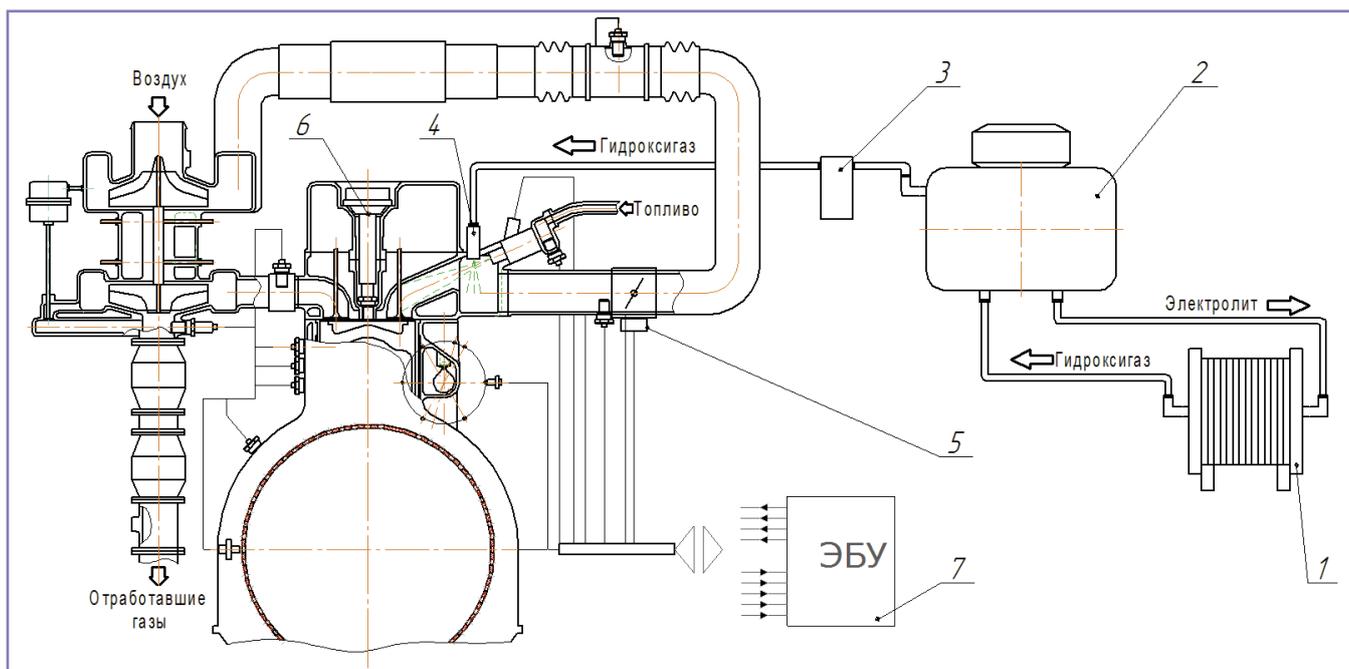
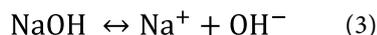


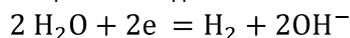
Рис. 1. Схема установки электролизера и его компонентов совместно с двигателем внутреннего сгорания: 1 – электролизер; 2 – резервуар с электролитом; 3 – фильтр тонкой очистки газа; 4 – штуцер подачи газа во впускной коллектор; 5 – дроссельная заслонка; 6 – модуль зажигания.

соотношении, установленном эмпирическим путем.

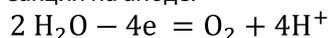
Вырабатываемый таким образом газ называется гидроксигазом (англ. ННО Gas или Oxyhydrogen), в научной литературе для данного газа используется термин «газ Брауна», названный в честь болгарского ученого Юллома Брауна, который одним из первых запатентовал свою модель электролизера, способного вырабатывать данный газ. Ниже (3) приведена формула образования газа для электролизера с щелочным электролитом.



Реакция на катоде:



Реакция на аноде:



На рис. 1 изображена схема установки электролизера, где вырабатываемый газ из электролизера (поз. 1) отводится через соединительную магистраль к резервуару с электролитом (поз. 2) и далее подается на фильтр тонкой очистки (мембрана, поглощающая аэрозольную взвесь электролита) (поз. 3). После этого газ поступает во впускной коллектор и камеры сгорания ДВС через штуцер подачи газа во впускной коллектор (поз. 4).

В данном случае гидроксигаз выступает в качестве добавки к топливно-воздушной смеси. Газовая смесь, подаваемая во впускной коллектор за счет создаваемого разрежения, затягивается в камеры сгорания и сгорает с рабочим телом топливно-воздушной смеси. Как ранее было отмечено, за счет высокой удельной теплоты сгорания водорода процесс сгорания ускоряется после воспламенения рабочего тела топливно-воздушной смеси. Топливо-воздушная смесь сгорает в большем объеме, за счет чего наблюдаются повышение энергоэффективности сгорания смеси в камерах сгорания и снижение выбросов токсичных веществ. Однако вследствие повышения горючести топливно-воздушной смеси, подаваемой в камеры сгорания ДВС, на некоторых режимах работы двигателя может появиться детонация при сгорании топлива.

Так, например, в ходе проведенных исследований в ВГТУ при оценке

влияния добавки водорода к бензовоздушной смеси сжиженных углеводородных газов было выявлено, что добавка 5% водорода к топливно-воздушной смеси увеличивает распространение фронта пламени в камере сгорания на 60–70% при различных значениях стехиометрического соотношения смеси (поддерживаемых в пределах $\alpha = 1$). Также было отмечено, что при наличии добавки водорода в составе топливно-воздушной смеси повышалась стабильность воспламенения смеси [4].

Детонация, вызванная таким образом, может привести к быстрому выходу из строя механических элементов и узлов двигателя. Поэтому в бензиновых двигателях необходимо осуществить коррекцию углов опережения зажигания (УОЗ) на соответствующих режимах работы ДВС, а на дизельных двигателях – углов впрыска топлива.

Как указывалось ранее, электролизеры для транспортных средств имеют различную производительность. Для двигателей различного объема и вида применяемого топлива необходимо подобрать электролизер соответствующей производительности. По данной тематике было произведено множество экспериментов и опытов, например, согласно экспериментальным исследованиям турецких ученых [5], использование электролизера с производительностью от 20 л/час для двигателей с рабочим объемом 1,5–3,0 литра в городском цикле дало значительное снижение расхода топлива для испытываемых автомобилей от 25% и более.

Ввиду вышеизложенного, посредством использования предложенной схемы и электролизера можно однозначно сделать следующие выводы:

- не внося существенных изменений в конструкцию системы топливоподачи ДВС, можно добиться оптимальной компоновки и установки электролизера и его компонентов (рис. 1);
- в случае применения предложенной схемы на транспортных средствах с электронным блоком управления двигателем необходима коррекция таблиц углов опережения зажигания и впрыска для различных режимов работы ДВС;

- отсутствие емкостей для хранения гидроксигаса существенно увеличивает безопасность использования электролизера на борту транспортного средства.

Выработка водорода при помощи электролизера на борту транспортного средства – это энергозатратный процесс. Так, например, для максимальной производительности электролизера (2–2,5 л/мин) на борту легкового автомобиля с рабочим объемом двигателя 1,5–2,5 литра потребляемая мощность составит около 400 Вт электрической энергии (сила тока составляет около 30 А). Однако иностранные разработчики подобных систем фиксируют уменьшение расхода топлива на транспортных средствах, где электролизер получает питание от штатной системы энергоснабжения без вмешательства в ее конструкцию.

В этой связи предлагается подавать питание на электролизер от установленной на борту транспортного средства системы рекуперации энергии. В одном из вариантов это турбоэлектрогенератор, устанавливаемый в системе выпуска отработавших газов, мощность которого в режиме «генератора» составляет до 10% от мощности двигателя на повышенных оборотах ДВС [9]. Тем самым, не отбирая мощности у ДВС, можно обеспечить электролизер электрической энергией. И таким образом, преобразовывая тепловую энергию отработавших газов в электрическую энергию, можно вырабатывать гидроксигаз с высоким содержанием водорода. В настоящее время группой авторов ведется работа по созданию и проверке алгоритма управления турбоэлектрогенератором и электролизером и управления вышеописанного процесса.

Литература:

1. Физическая энциклопедия / Д. М. Алексеев, А. М. Балдин и др., под общ. ред. А. М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1999. – Т. 5.
2. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. – М.: Физматлит, 2008.
3. Общая химическая технология. Под ред. И. П. Мухленова. Учебник для химико-технологических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1984.

4. Улучшение процесса сгорания сжиженного углеводородного газа добавками водорода / Е.А. Федянов [и др.] // Молодой ученый. – 2013. – № 3. – С. 111–114.
5. Смоленский В.В., Смоленская Н.М., Шайкин А.Г. Влияние добавки водорода на процесс горения в бензиновых двигателях с искровым зажиганием / Прогресс транспортных средств и систем – 2009: Материалы Международной научно-практической конференции.
6. Z. Dulger, K.R. Ozcelic. Fuel economy improvement by on a board electrolytic hydrogen production (Internation Journal of Hydrogen Energy, 2000).
7. Регенерация энергии для повышения эффективности силовой установки гибридных автомобилей / В.М. Власов, П.Н. Ключин, В.Н. Полякова // Научно-производственный журнал «Автотранспортное предприятие» – март 2013.
8. Компаундный турбоэлектрогенератор в системе выпуска отработавших газов / П.Н. Ключин, Е.М. Овсянников, А.В. Акимов // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Серия «Транспортные средства и энергетические установки». – М.: МГТУ «МАМИ», № 1 (19), 2014.
9. Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на дизельно-водородных топливных композициях / В.Ф. Каменев, В.М. Фомин, Н.А. Хрипач // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ, № 7 (27), 2005.
10. Водород как химический реагент в кинетическом механизме образования углерода в дизеле / В.М. Фомин, Р.Р. Хакимов, Д.М. Шевченко // Международный научно-

технический журнал «Транспорт на альтернативном топливе», № 3 (21) / 2011 г.

11. Овсянников Е.М., Долбилин Е.В., Кошляев Е.М. Электрооборудование автотранспортных средств с тяговыми электроприводами. – М.: Палеотип, 2010.

Овсянников Евгений Михайлович – родился в 1948 году. В 1974 году окончил Московский энергетический институт по специальности «Электропривод». Доктор технических наук, профессор. В 2003 году защитил докторскую диссертацию по теме: «Электроприводы гелиоустановок наземного и космического базирования. Теория и практика». Опыт работы – 40 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электротехника» МГТУ «МАМИ». Имеет более 80 научных и методических трудов, 16 авторских свидетельств и патентов на изобретение, 2 монографии.

Ключин Павел Николаевич – родился в 1981 году. В 2003 году окончил МГТУ «МАМИ» по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». Кандидат технических наук. В 2006 году защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Стержневые катушки микропроцессорных систем управления бензиновым двигателем». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время – доцент кафедры АТЭ МГТУ «МАМИ», директор по развитию ООО «Инжиниринговый центр «СМАРТ». Имеет более 20 публикаций, в том числе методические пособия с грифом УМО.

Акимов Александр Вячеславович – родился в 1992 году. В 2013 году окончил Университет машиностроения (МАМИ) по специаль-

ности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает инженером-электроником 1-й категории в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Ovsyannikov Evgeniy – was born in 1948. In 1974 graduated from Moscow Power Institute, specialization is «Electric drive». Doctor of Engineering, professor. In 2003 he defended Doctorate thesis, the theme is: «Land-based and space-based solar station electric drivers. Theory and practice». Job experience is 40 years. At present is working as professor of «Electrical engineering» department in MGTU «MAMI». The author of more than 80 scientific and methodological works, 16 authors certificates and invention patents, 2 monographs.

Klyukin Pavel – was born in 1981. In 2003 he graduated from MGTU «MAMI» with specialization in «Automobile and tractor electrical equipment». He is a candidate of Engineering Sciences. In 2006 he defended a Candidate thesis in the subject: «Rod coils of petrol engine microprocessor control systems». His work experience is 10 years. At present he is associate professor of ATE department in MGTU «MAMI», development director of the «Engineering center «SMART» LLC. He has more than 20 publications, including methodological guides with UMO stamp.

Akimov Aleksandr – was born in 1992. In 2013 he graduated from MGTU «MAMI» with specialization in «Automobile and tractor electrical equipment». His work experience is 5 years. At present he works as electronic engineer of the 1 category in SSC RF FSUE «NAMI».

Качественный анализ эффективности применения различных топологий преобразователей в бортовых электроприводах

// Qualitative analysis of application effectiveness of used for airborne electric drives converters various topologies //

Волокитина Е. В., к. т. н.,
АО «Электропривод», г. Киров

Смирнов Д. С., Хорошавин В. С., д. т. н., профессор,
Охапкин С. И., к. т. н., доцент,
ГОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров

*В статье приведены наиболее перспективные топологии преобразователей частоты для управления авиационными электродвигателями с мощностью от 0,5 до 50 кВт, а также проведено их сравнение по ряду параметров. На основании проведенного анализа делаются выводы об оптимальных конфигурациях силовой части преобразователя для систем различного назначения.
Ключевые слова: преобразователь частоты, топология преобразователя, инвертор, матричный преобразователь, электропривод, балластный резистор, динамические потери, статические потери, электромагнитная помеха.*

The article presents the review and comparison of most advanced topologies of frequency converters, used for control of 0,5 to 50 kW electric motors, qualified for airborne applications. Taking as a basis this analysis, conclusions about optimal configuration of power section of multipurpose converter was made.

Keywords: frequency converter, converter topology, inverter, matrix converter, electrodrive, ballast resistor, dynamic losses, static losses, electromagnetic disturbance.

В настоящее время благодаря непрерывно возрастающим возможностям электроприводов, являющихся основными приемниками электроэнергии на борту летательных аппаратов (ЛА), на самолетах нового поколения растет мощность потребления электрической энергии.

Новое поколение авиационных электроприводов реализуется на основе вентильных электродвигателей постоянного тока (ВДПТ) с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Такая тенденция обусловлена преимуществами ВДПТ и бурным ростом вычислительной мощности микроэлектроники, а также возможностью интеграции электродвигателей с силовым преобразователем.

Современный электропривод с интеллектуальным управлением включает в себя ряд ключевых функциональных элементов. В первую очередь силовой AC/AC преобразователь, расположенный между элек-

трической машиной и сетью, который служит для изменения частоты, фазы и амплитуды питающей сети в соответствии с алгоритмом управления двигателем.

В связи с жесткими требованиями по массе и габаритам, предъявляемыми к авиационным электроприводам, целесообразно выполнить анализ различных конфигураций AC/AC преобразователей. Во внимание следует принять размеры элементов силовой части системы, сложность системы

управления, а также потери в преобразователе и электродвигателе.

В авиационном электроприводе для питания управляющих цепей используется сеть постоянного тока напряжением 27 В, а для питания силовых цепей – сеть переменного тока напряжением 115/200 В постоянной (400 Гц) или переменной (360–800 Гц) частоты. Как правило, мощность авиационных электроприводов составляет от 0,5 до 50 кВт. Для работы в заданном диапазоне напряжений и мощностей целесообразно использование стандартных типов полупроводниковых приборов: диодов и тиристоров в выпрямителе и БТИЗ/МОП транзисторов в инверторе.

Рассмотрим возможные топологии преобразователей частоты для управления высокоскоростными электрическими машинами. Имеются два подхода к построению подобных преобразователей: преобразователь частоты с непосредственной связью (ПЧНС/НПЧ) и преобразователь частоты со звеном постоянного тока (ПЧ ЗПТ). В первом случае производится прямая коммутация фаз питающей сети на обмотки электродвигателя за счет двунаправленных транзисторных ключей. Промежуточного выпрямления тока и использования накопителей (дросселей и конденсаторов) не предусматривается. Во втором случае, напротив, энергия

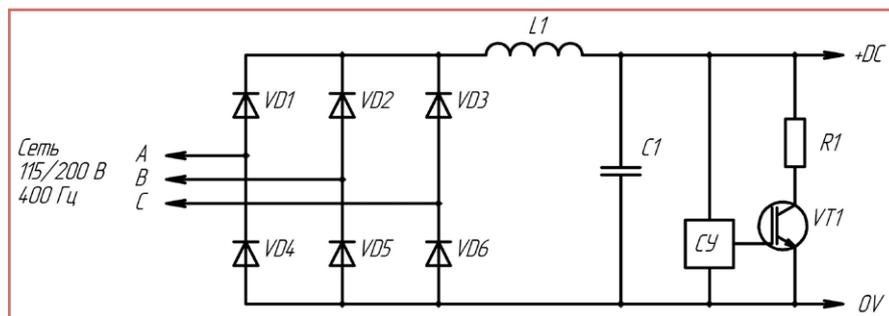


Рис. 1. Неуправляемый выпрямитель со звеном постоянного тока и балластной цепью.

проходит через выпрямитель, звено постоянного тока и инвертор. В подавляющем большинстве ПЧ ЗПТ синусоидальный ток в обмотках электродвигателя обеспечивается за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Подобные преобразователи должны содержать емкостный накопитель энергии, необходимый для компенсации реактивной мощности электродвигателя. Существует множество разновидностей конструкции ПЧ ЗПТ с различными видами выпрямителей, корректоров коэффициентов мощности (ККМ), балластных звеньев и инверторов. Как правило, наиболее сложной и мощной частью ПЧ ЗПТ является инвертор. По этой причине в дальнейшем рассматривается следующая конфигурация ПЧ ЗПТ (рис. 1): неуправляемый мостовой выпрямитель без ККМ, балластная цепь на основе резисторов и трехфазные инверторы различных типов.

Далее оценивается матричная топология преобразователя частоты с непосредственной связью, а также различные варианты топологий инверторов для работы в составе преобразователей частоты со звеном постоянного тока:

- двухуровневый инвертор;
- трехуровневый инвертор с Т-мостом;
- двухтактный инвертор.

Максимальная выходная частота всех рассматриваемых преобразователей не ограничена топологией. Она зависит лишь от быстродействия силовых ключей и допустимого уровня динамических потерь. Повышение этой частоты во многих случаях по-

зволяет добиться заметного улучшения массогабаритных показателей электропривода, а также обеспечить функциональную гибкость системы.

Общие достоинства преобразователей частоты со звеном постоянного тока:

- нечувствительность к низкому качеству электроэнергии;
- высокая стойкость к импульсным перенапряжениям как по входу, так и по выходу;
- возможность работы с полной мощностью при обрыве одного линейного провода;
- сравнительно простые силовая схема и система управления;
- малое количество требуемых источников питания.

Практически все достоинства ПЧ ЗПТ объясняются наличием накопительного конденсатора с большой энергоемкостью. При помощи накопительной емкости могут быть скомпенсированы неравномерность поступления энергии от сети или ненадлежащее ее качество.

Общие недостатки ПЧ ЗПТ:

- возникновение ударного тока при подключении к сети;
- высокий коэффициент нелинейных искажений;
- низкий коэффициент мощности;
- наличие массивных накопительных емкостей;
- невозможность рекуперации энергии при торможении.

Все эти недостатки могут быть устранены за счет усложнения системы. Ударный ток может быть ограничен за счет цепи предварительного заряда и управляемого выпрями-

теля, а качество потребления тока может быть улучшено за счет активного или пассивного ККМ. Возможность рекуперации может быть обеспечена использованием полностью управляемого выпрямителя-инвертора с собственной системой контроля. Все эти меры приводят к увеличению статических потерь и массы преобразователя, а также к снижению надежности. Целесообразность их использования в авиационных электроприводах зависит от требований к конкретной системе.

По причине невозможности передачи энергии из ПЧ ЗПТ в сеть при торможении электропривода или при работе ВДПТ в генераторном режиме генерируемая энергия должна быть рассеяна внутри преобразователя при помощи балластных цепей. Потери энергии в балластном резисторе ПЧ ЗПТ можно рассчитать по формуле

$$E_T = \frac{(J_P + J_H) \cdot (\omega_{нач}^2 - \omega_{кон}^2)}{2} + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M(\varphi) \cdot d\varphi - \Delta E_C \quad (1)$$

где J_P – момент инерции ротора, кг·м²;

J_H – приведенный к ротору момент инерции нагрузки, кг·м²;

$\omega_{нач}$ – начальная угловая скорость ротора, рад/с;

$\omega_{кон}$ – конечная угловая скорость ротора, рад/с;

φ_1 – начальное положение нагрузки;

φ_2 – конечное положение нагрузки;

$M(\varphi)$ – помогающий момент нагрузки, Н·м;

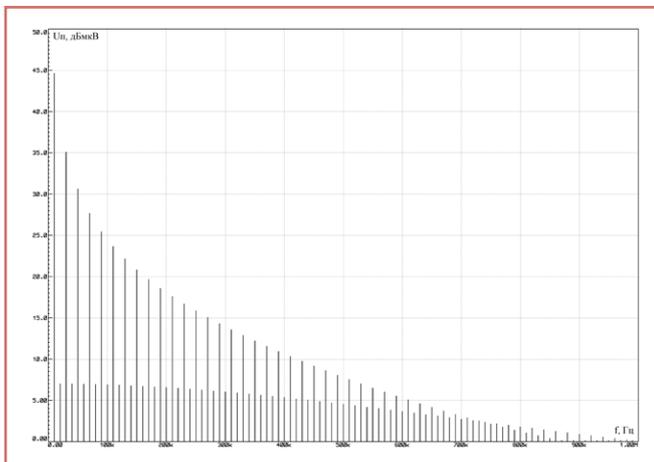


Рис. 2. Спектр напряжения на транзисторе при коэффициенте заполнения 0,5.

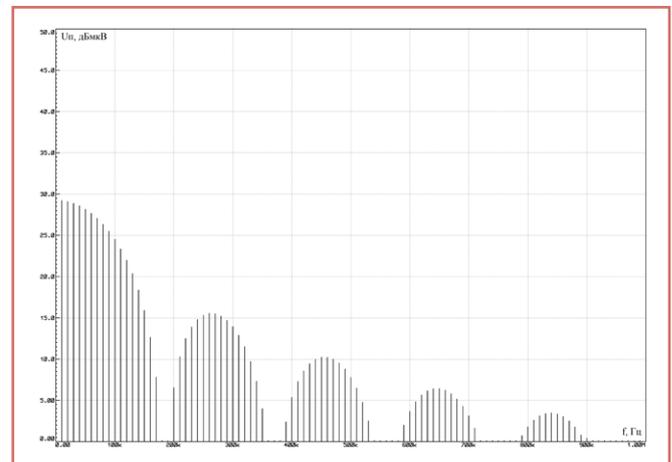


Рис. 3. Спектр напряжения на транзисторе при коэффициенте заполнения 0,05.

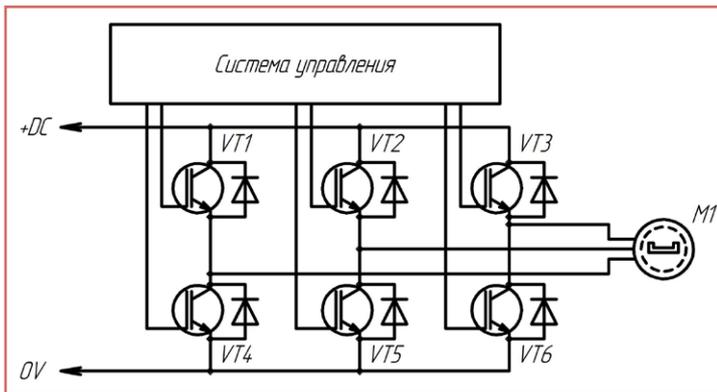


Рис. 4. Двухуровневый мостовой инвертор.

ΔE_C – энергия, запасаемая в конденсаторах звена постоянного тока, Дж.

Поскольку балластные цепи, как правило, реализуются с гистерезисом по напряжению, дополнительно запасаемая при торможении энергия находится в диапазоне

$$\Delta E_{C.min} = \frac{C \cdot (U_{omn}^2 - U_A^2)}{2} \quad (2)$$

$$\Delta E_{C.max} = \frac{C \cdot (U_{cp}^2 - U_A^2)}{2} \quad (3)$$

где C – емкость конденсаторов ЗПТ, Ф;

U_{omn} – напряжение отпущения балласта, В;

U_{cp} – напряжение срабатывания балласта, В;

U_A – амплитуда линейного напряжения питающей сети, В.

Как правило, накопленная механическая энергия системы многократно превышает энергоемкость конденсаторов ЗПТ, поэтому при расчете выделения тепла на балласте последней можно пренебречь.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили ПЧ ЗПТ с двухуровневыми мостовыми инверторами (рис. 4), имеющие сравнительно простую структуру и систему управления. Для управления шестью силовыми ключами требуются четыре гальванически изолированных источника питания (ИП). В силовой цепи ток последовательно протекает через два диода и два транзистора с суммарным падением напряжения на них 4...6 В. Этим напряжением определяются умеренные статические потери в преобразователе. Основной недостаток этой схемы – высокий уровень пульсаций напряжения на нагрузке. Амплитуда пуль-

саций на силовом ключе и на нагрузке равна напряжению в звене постоянного тока (+DC), что приводит к повышенным динамическим потерям в транзисторах [1], повышенным потерям в электродвигателе и большой мощности излучаемых помех. Кроме того, к прочности изоляции электрической машины предъявляются более жесткие требования.

На рис. 2 и 3 показаны гармонические спектры напряжения на ключах в режиме ШИМ при частоте модуляции 10 кГц, напряжении $U_{зпт} = 270$ В, токе нагрузки 10 А и различных коэффициентах заполнения. Моделирование проведено в пакете Proteus VSM с использованием модели ключа IRGP50B60PD1.

Как видно из графиков, IGBT-транзисторами инвертора создаются радиопомехи в диапазонах от сверхдлинных (СДВ) до средних волн (СВ) – от 10 кГц до 1 МГц. Напряжение помех составляет до 45 дБмкВ на первой гармонике. Более высокочастотные

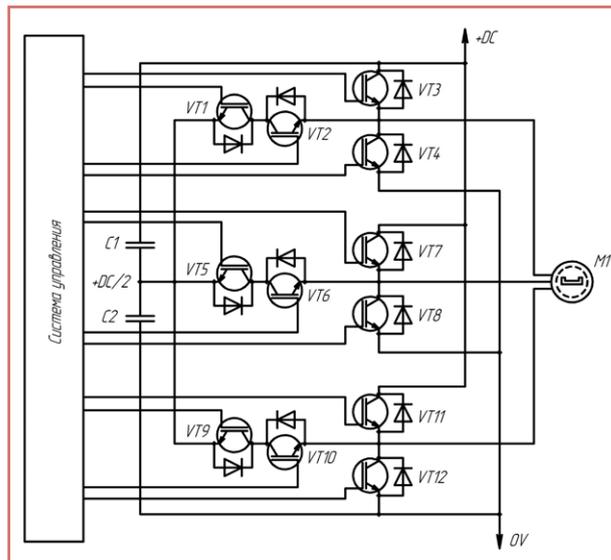


Рис. 5. Трехуровневый инвертор с T-образным мостом.

помехи (от 1 до 300 МГц) преимущественно создаются при обратном восстановлении антипараллельных диодов инвертора [2].

Уменьшить негативные эффекты от высокочастотной пульсации напряжения на нагрузке можно за счет применения выходных LC-фильтров, также известных как синус-фильтры. Размеры этих фильтров обратно пропорциональны несущей частоте ШИМ, однако при увеличении частоты растут и динамические потери в инверторе. Таким образом, двухуровневый инвертор относительно прост и надежен, но требует использования ключей с малыми динамическими потерями.

Трехуровневый инвертор (рис. 5) является частным случаем многоуровневого инвертора, в котором имеются вспомогательные узлы силовой цепи с потенциалами в интер-

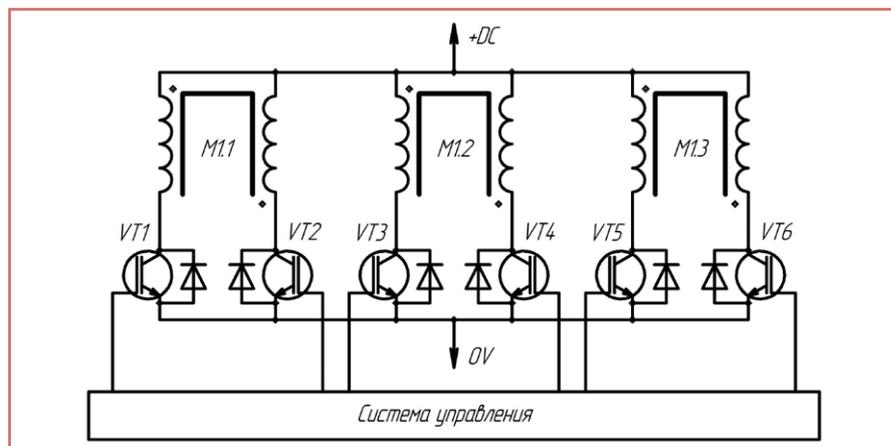


Рис. 6. Двухтактный (push-pull) инвертор.

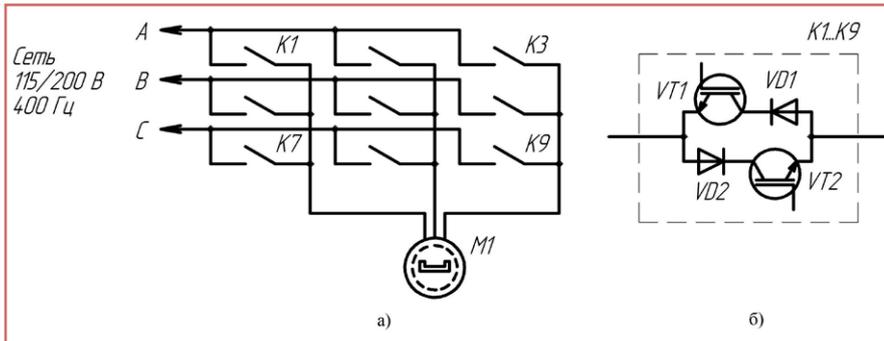


Рис. 7. Матричный преобразователь частоты:
а) схема коммутации; б) структура двунаправленного ключа.

вале между нулевым и полным напряжением звена постоянного тока. В случае с трехуровневым инвертором вспомогательный источник $+DC/2$ создается за счет емкостного делителя напряжения. Для управления двенадцатью силовыми ключами требуются пять изолированных источников питания. В силовой цепи ток последовательно протекает через три диода и два транзистора с суммарным падением напряжения на них 5...7 В. Основное достоинство схемы – уменьшение амплитуды пульсаций напряжения в два раза по сравнению с двухуровневой схемой [3], что приводит к значительному снижению динамических потерь и мощности помех. Недостатки топологии – несколько повышенные статические потери, потребность в дополнительном источнике питания, усложнение алгоритма управления и увеличение в два раза количества силовых ключей. В многоуровневых инверторах возможен полный отказ от ШИМ с резким сокращением мощности помех и динамических потерь в инверторе [4]. Многоуровневые инверторы позволяют получить высокое качество электропитания для высокоскоростных электродвигателей, но имеют повышенную массу и, в сравнении с двухуровневыми, менее надежны.

Двухтактный инвертор (рис. 6) по свойствам схож с двухуровневым инвертором и, в некотором смысле, является его модификацией. Двухтактные инверторы требуют использования в комплекте с нестандартными электрическими машинами. В данных машинах вместо одной фазной обмотки закладываются две, что позволяет создавать переменное магнитное поле без реверсирования напряже-

ния. Очевидное преимущество данной топологии – требуется лишь один источник питания для управления всеми шестью ключами. Статические потери также ниже, чем в двухуровневом инверторе. Ток проходит через два диода и один транзистор (общее падение напряжения – 3...5 В). Недостатки схемы – повышенные омические потери в обмотках электродвигателя и увеличение массы кабеля. Амплитуда пульсаций напряжения на ключе также выше – двойное значение напряжения $+DC$, что приводит к повышенному уровню динамических потерь. Двухтактные инверторы не получили широкого распространения, но имеют максимально простую конструкцию с единственным источником питания ключей.

Матричный преобразователь частоты (МПЧ) относится к ПЧНС и принципиально отличается от описанных выше преобразователей (рис. 7). В нем происходит прямая коммутация входных и выходных цепей через комплект двунаправленных ключей [5].

Преимущества МПЧ связаны с отсутствием в конструкции накопительных электролитических конденсаторов:

- малый объем и масса силовой части преобразователя;
- повышенный ресурс;
- высокий коэффициент мощности и низкий коэффициент нелинейных искажений без применения ККМ;
- возможность рекуперации энергии без вспомогательных устройств;
- меньшая мощность помех;
- меньшее напряжение на силовом ключе при коммутации;
- возможность длительной работы при повышенной температуре среды.

МПЧ наиболее эффективен при работе с выходным напряжением, близким к напряжению питания. Основной недостаток топологии – большое количество ключей и источников питания. Для реализации стандартного преобразователя частоты с питанием трехфазного электродвигателя от трехфазной сети требуются восемнадцать силовых ключей и шесть гальванически изолированных источников питания. Тем не менее уровень статических потерь близок к уровню двухуровневого инвертора. Количество полупроводников в токовой петле то же – два диода и два транзистора. В настоящее время многими компаниями ведутся работы [6, 7, 8] в направлении МПЧ, что объясняется улучшением качества и снижением стоимости полупроводниковых ключей.

Статические потери в ПЧ ЗПТ можно оценить по следующим формулам [1, 9]

$$P_{cm} = P_{cm.выпр} + P_{cm.IGBT} + P_{cm.FRD} \quad (4)$$

$$P_{cm.выпр} = \frac{P_{\delta s}}{U_{DC}} \cdot 2 \cdot U_D \quad (5)$$

$$P_{cm.IGBT} = \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{U_{A.вых}}{4 \cdot U_{DC}} \right) \cdot U_{CE} \cdot I_{A.вых} \cdot N_{IGBT} \quad (6)$$

$$P_{cm.FRD} = \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{U_{A.вых}}{4 \cdot U_{DC}} \right) \cdot U_{FRD} \cdot I_{A.вых} \cdot N_{FRD} \quad (7)$$

где $P_{cm.выпр}$ – статические потери в выпрямителе, Вт;

$P_{cm.IGBT}$ – статические потери в IGBT, Вт;

$P_{cm.FRD}$ – статические потери в антипараллельных диодах, Вт;

$P_{\delta s}$ – мощность, потребляемая двигателем, Вт;

U_{DC} – напряжение звена постоянного тока, В;

$U_{A.вых}$ – амплитудное значение линейного напряжения электродвигателя, В;

U_D – падение напряжения на выпрямительном диоде, В;

U_{CE} – напряжение насыщения перехода коллектор-эмиттер IGBT, В;

U_{FRD} – падение напряжения на антипараллельном (силовом высоко-частотном) диоде, В;

$I_{A.вых}$ – амплитудное значение линейного тока электродвигателя;

Таблица 1.

Топология*	Критерии сравнения**						
	Статические потери	Динамические потери	Количество транзисторов	Сложность СУ	Количество ИП	Качество потребления	Генерация помех
ДУИ	+++	+	6	+++	4	+	+
ТУИ	++	++	12	++	5	+	++
ДТИ	+	+	6	+++	1	+	+
МПЧ	+++	+++	18	+	6	+++	+++

*ДУИ – двухуровневый инвертор; ТУИ – трехуровневый инвертор; ДТИ – двухтактный инвертор; МПЧ – матричный преобразователь частоты.

** +++ – высокие показатели; ++ – средние показатели; + – низкие показатели.

N_{IGBT} – количество последовательно включенных IGBT;

N_{FRD} – количество последовательно включенных антипараллельных диодов.

Статические потери в матричном преобразователе вычисляются несколько проще

$$P_{ст} = \frac{2 \cdot I_{A,вых}}{\pi} \cdot N_{кл} \cdot U_{кл} \quad (8)$$

где $N_{кл}$ – количество последовательных двунаправленных ключей (для МПЧ – 2 шт.);

$U_{кл}$ – падение напряжения на двунаправленном ключе в открытом состоянии, В.

Очевидно, что наименее возможными статическими потерями обладают преобразователи с меньшим количеством последовательно включенных элементов. В данном методе расчета статических потерь приняты допущения о нулевом дифференциальном сопротивлении компонентов и работе двигателя с $\cos(j) = 1$ (векторное управление).

Динамические потери в инверторе могут быть определены по методике компании Semikron [1, 9]

$$P_{дин} = P_{дин.IGBT} + P_{дин.FRД} \quad (9)$$

$$P_{дин.IGBT} = f_{sw} \cdot E_{on+off} \cdot N_{IGBT} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_{вых}}{I_{ref}} \cdot \left(\frac{\Delta U_{кл}}{U_{ref}}\right)^{Kv1} \cdot (1 + TC_{ESW} \cdot (T_{J(IGBT)} - T_{REF})) \quad (10)$$

$$P_{дин.FRД} = f_{sw} \cdot E_{rr} \cdot N_{FRD} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_{вых}}{I_{ref}}\right)^{Ki} \cdot \left(\frac{\Delta U_{кл}}{U_{ref}}\right)^{Kv2} \cdot (1 + TC_{ERR} \cdot (T_{J(FRD)} - T_{REF})) \quad (11)$$

где $P_{дин.IGBT}$ – динамические потери в IGBT транзисторах инвертора, Вт;

$P_{дин.FRД}$ – динамические потери в FRD диодах инвертора, Вт;

f_{sw} – частота коммутации, Гц;

E_{on+off} – энергия суммарных динамических потерь транзистора (по спецификации), Дж;

E_{rr} – энергия потерь при обратном восстановлении диода (по спецификации), Дж;

$I_{вых}$ – действующий ток электродвигателя, А;

I_{ref} – ток ключа при нормированной энергии потерь (по спецификации), А;

$\Delta U_{кл}$ – падение напряжения на разомкнутом ключе после окончания коммутации, В;

U_{ref} – напряжение на ключе при нормированной энергии потерь (по спецификации), В;

$Ki = 0,6; Kv1 = 1,4; Kv2 = 0,6$ – эмпирические коэффициенты;

$TC_{ESW} = 0,003$ – температурный коэффициент динамических потерь IGBT;

$TC_{ERR} = 0,006$ – температурный коэффициент динамических потерь FRD;

T_{REF} – температура ключа при нормированной энергии потерь, °C;

$T_{J(IGBT)}$ – фактическая температура перехода IGBT, °C;

$T_{J(FRD)}$ – фактическая температура перехода FRD, °C.

Как следует из формул, минимуму динамических потерь соответствуют нулевые напряжение на ключе и ток через него в момент коммутации.

Точный расчет потерь в каждой из топологий зависит от алгоритма управления и выходит за рамки данной работы.

Качественное сравнение преобразователей различных типов по основным параметрам приведено в таблице 1.

Проведенный анализ показывает, что каждая из рассмотренных топологий преобразователя имеет свои преимущества и недостатки. При жестких требованиях к электромагнитной совместимости или сроку службы оптимальным будет использование матричного преобразователя, а при высоких требованиях к надежности – преобразователя частоты с двухтактным инвертором. По этой причине нельзя однозначно ответить на вопрос о лучшей топологии преобразователя авиационных электроприводов. Любая из описанных силовых схем обеспечивает разумный компромисс между малой массой, высокой эффективностью, большим ресурсом, высокой надежностью и устойчивостью к неблагоприятным внешним факторам.

Литература:

1. Смирнов Д. С., Охапкин С. И., Половенко В. Т. Оценка эффективности применения силовых ключей в бортовых электроприводах / Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3.
2. Колпаков А., Журавлев Л. Проблемы электромагнитной совместимости мощных импульсных преобразователей напряжения / Силовая электроника. – 2006. – № 2.
3. Филатов В. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT. Перспективные решения / Силовая электроника. – 2012. – № 4.
4. HVDC PLUS – Basics and Principle of Operation. / Сайт компании Siemens. URL: http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Plus_Basic%20and%20Principals.pdf
5. Кондаков Л. А., Шукин А. А. Матричные преобразователи частоты / ИСУП. – 2013. – № 1.
6. Описание преобразователей частоты серии AC7 компании YASKAWA. URL: <https://www.yaskawa.com/pycprd/products/>

industrial-ac-drives/ general-purpose-drives/
ac7-matrix-drive

7. Schulz M., Lillo L., Empringham L., Wheeler P. Pushing Power Density Limits using SiC-JFET-based Matrix Converter / Сайт компании Infineon. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PCIM_2011_Power_density_with_SiC_JFET-ED-v1.0-en.pdf?fileId=db3a3043399628450139b550fd257554

8. Itoh J., Odaka A., Sato I. High efficiency power conversion using a matrix converter. / FUJI electric review. – Vol 50. – № 3. Сайт компании FUJI. URL: <http://www.fujielectric.com/company/tech/pdf/r50-3/06.pdf>

9. Wintrich A., Nicolai U. Application Manual: Power Semiconductors / Сайт компании Semikron. – URL: http://www.semikron.com/skcompub/en/SEMIKRON_Application_Manual_Power_Semiconductors_.pdf

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 27 лет, авиационного электропривода – 17 лет. Автор более 80 научных трудов.

Смирнов Дмитрий Сергеевич – родился в 1989 году. В 2011 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электропривод и автоматика промышлен-

ных установок». Опыт работы в области силовой электроники – 4 года. В настоящее время является аспирантом кафедры ЭП и АПУ ВятГУ. Имеет 5 публикаций.

Хорошавин Валерий Степанович – родился в 1948 году. В 1971 году окончил Кировский политехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика». Доктор технических наук, профессор. В 1993 году защитил диссертацию по теме: «Прикладные методы качественного исследования особых управлений и структур нелинейных оптимальных систем». Опыт работы – 40 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электропривод и автоматика промышленных установок» ФАВТ ВятГУ. Имеет 193 публикации, 14 патентов.

Охупкин Сергей Иванович – родился в 1959 году. В 1986 году окончил Кировский политехнический институт по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок». Кандидат технических наук, доцент. В 2003 году защитил диссертацию по теме: «Создание и исследование электромеханических устройств средств малой механизации на основе специализированных преобразователей частоты». Опыт работы – 37 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электропривод и автоматика промышленных установок» ФАВТ ВятГУ. Имеет 107 публикаций, 1 патент.

Volokitina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equip-

ment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 27 years, aviation electric drivers – 17 years. She is the author of 80 scientific works.

Smirnov Dmitry – was born in 1989. In 2011 he graduated from Vyatskiy State University with specialization in «Electrical drive and automatics of industrial machines». His work experience in the area of power electronics is 4 years. At present he is a postgraduate of the department Electrical drive and automatics of industrial machines in VyatSU. He has 5 publications.

Khoroshavin Valery – was born in 1948. In 1971 he graduated from Kirovskiy Polytechnic Institute with specialization in «Automatics and telemechanics». He is a Doctor of Science, professor. In 1993 he defended a thesis on the subject: «Applied approaches of the qualitative research of singular controls and structures of nonlinear optimal systems». His work experience is 40 years. At present he works as professor of the department «Electrical drive and automatics of industrial machines» at FAUT of VyatSU. He has 193 publications, 14 patents.

Okhupkin Sergey – was born in 1959. In 1986 he graduated from Kirovskiy Polytechnic Institute with specialization in «Electrical drive and automatics of industrial machines». He is a Candidate of Science, docent. In 2003 he defended a thesis on the subject: «Creation and investigation of electromechanical devices of small-scale mechanical means on the basis of specialized frequency converters». His work experience is 37 years. At present he is a head of the department «Electrical drive and automatics of industrial machines» at FAUT of VyatSU. He has 107 publications, 1 patent.

ВОЛОКИТИНА Елена Владимировна

27 июня 2015 года скоропостижно скончалась руководитель проекта АО «Электропривод» Волокитина Елена Владимировна.

Елена Владимировна родилась 16 мая 1959 года в городе Мураши Кировской области.

В АО «Электропривод» Елена Владимировна пришла 24 августа 1981 года после окончания с отличием Кировского политехнического института по специальности «Инженер-электромеханик», и с тех пор вся ее трудовая жизнь была неразрывно связана с этим предприятием, на котором она проработала почти 34 года. До 2002 года она занималась расчетами электрических машин в расчетной бригаде конструкторского отдела, пройдя профессиональный путь от конструктора до конструктора 1-й категории. В 1995 году была назначена начальником расчетного бюро конструкторского отдела, а в 2002 году – ведущим конструктором – руководителем проектов.

В 2006 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по специальности «Электротехнические комплексы и системы».

С 2007 года – доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» ГОУ ВПО «Вятский государственный университет».

Одним из направлений работы Елены Владимировны являлась разработка электрических машин и вентильных электродвигателей постоянного тока. Под ее руководством и при непосредственном участии разработаны вентильные электродвигатели, применяемые в изделиях для самолетов Ан-70, Ил-76, Ил-96, Ту-204, Ту-214, Ту-324, Ту-334, Ил-114, вентильные электродвигатели для управления газодинамическим процессом запуска газотурбинного привода, для хирургического электропривода, электропривода мотор-колеса для электромобиля.

Под руководством Елены Владимировны внедрена комплексная система автоматизированного проектирования (САПР), позволившая проводить автоматизированное конструирование электрических машин, электромеханизмов, электронных блоков, схемотехническое проектирование электронных схем и автоматизированное проектирование печатных плат.

Разработан ряд вентильных высокомоментных электродвигателей серии ДБМ для универсальных технологических роботов в рамках государственного контракта по импортозамещению.

В последнее время Елена Владимировна руководила разработками электроприводов различного назначения на базе вентильных электродвигателей, а также вновь востребованным тематическим направлением бортовых систем генерирования и запуска. Одна из последних ее разработок – электропривод реверсивного устройства для двигательной установки с двигателем ПД-14 для самолета МС-21.

Ею опубликовано более 80 научных трудов, получено 2 патента на изобретения. В 2014 году опубликована монография «Компоненты интеллектуальных мехатронных модулей» в соавторстве с профессором В. А. Нестериним.

Елена Владимировна являлась достойным продолжателем лучших достижений и традиций конструкторской школы предприятия, успешно продолжала развивать начатые специалистами предприятия еще в 70-х годах прошлого века работы по перспективному направлению в технике и науке – вентильным электродвигателям и электроприводам на их основе.

Она была неутомимым тружеником, ярким генератором новых идей, всегда удивляла своей неистощимой энергией, огромной работоспособ-



ностью, творческим размахом. Весь ее трудовой путь ознаменован крупными успехами в научно-исследовательской и образовательной деятельности, в создании новых изделий высокого технического уровня.

За свои деловые качества, доброту и честность Елена Владимировна пользовалась огромным уважением со стороны всех, с кем ей приходилось общаться на работе, в институте, в быту.

Ее достижения в труде и научной работе высоко оценены наградами и поощрениями АО «Электропривод», знаком «Отличник качества авиационной промышленности», Почетной грамотой администрации Кировской области, Почетной грамотой Министерства промышленности и энергетики РФ, Дипломом лауреата № 11-1759 Всероссийского конкурса «Инженер года» по версии «Профессиональные инженеры» в номинации «Электротехника» и Сертификатом профессионального инженера России № 11-75.

У нее было много текущих дел, которые она взваливала на свои хрупкие плечи без всякой меры, совершенно не жалея себя, было много планов и творческих, и личных, но... Все оборвалось в один момент...

Безвременная кончина Елены Владимировны – удивительно обаятельной, притягательной и интересной женщины, талантливого ученого и конструктора, доброго и отзывчивого коллеги и друга – тяжелая и горькая утрата для всех, кому посчастливилось знать ее лично.

Редакция журнала выражает глубокие соболезнования родным, близким и коллегам Елены Владимировны. Светлая память о ней навсегда сохранится в наших сердцах.

Параметрические системы управления многодвигательного электропривода грузоподъемных механизмов

// Parametrical control systems of multiengine driver of the hoisting devices //

Доманов В. И., к.т. н.,
Доманов А. В., к.т. н.,
Гаврилова С. В.,
ФГБОУ ВПО «УлГТУ», г. Ульяновск

В работе рассматривается схема двух электроприводов, согласованных параметрически по скорости вращения. В качестве исполнительных предлагается использовать двухскоростные асинхронные двигатели. Для согласованной работы электроприводов используются свободные группы обмоток двигателей. Составлена модель и получены графики переходных процессов исследуемой системы.

Ключевые слова: согласованное вращение, параметрическое управление, двухскоростной асинхронный двигатель, модель, переходные процессы.

На современном этапе развития промышленности отмечается широкое применение электроприводов грузоподъемных механизмов (ГПМ), приводные электродвигатели которых, не имея механической связи, должны вращаться с одинаковой скоростью, например, механизмов передвижения порталных и козловых кранов.

Для обеспечения согласованности вращения двигателей, входящих в такие механизмы, применяют различные схемы управления, при этом наилучшие результаты достигаются при использовании преобразователей частоты в системах электропривода на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей (АД КЗ). В этом случае обеспечиваются широкий диапазон регулирования и высокая точность. Для этого необходимо использовать регулируемые преобразователи и датчики координат, в частности датчики скорости. В то же время существует большая группа электроприводов ГПМ, в которой не требуется широкого диапазона

This article covers schematic diagrams of two drives harmonized by velocity parameters. Double speed induction motor is advised to implement as an actuating device. For harmonized rotation of drives free groups of engine windings are used. Model is built for system and graphics of transient process are obtained.

Keywords: harmonized rotation, parametrical control, double speed induction motor, model, transient process.

регулирования и высокой точности. В этом случае целесообразнее использовать параметрические системы электропривода (СЭП), они более просты, надежны и не требуют использования преобразователей и дополнительных датчиков.

Для создания системы электропривода в [1] была предложена схема параметрического управления двухскоростного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (ДСАД). Для этого обмотки статора ДСАД разделялись на две независимые и равноценные группы, каждая из которых соединяется в звезду. Первая группа обмоток подключается к сети. При этом ЭДС на второй (свободной) группе обмоток пропорциональна скорости вращения.

ДСАД в таком включении можно использовать для создания СЭП, согласованных по скорости. Схема включения обмоток электрических машин, входящих в эту систему, приведена на рис. 1.

При совпадении скоростей вращения двигателей ($n_1 = n_2$) ЭДС на свободных обмотках также будут равны ($E_1 = E_2$). В этом случае токи по линиям связи между обмотками $\omega_{1,2}$ и $\omega_{2,2}$ не протекают. Если $n_1 \neq n_2$, то и $E_1 \neq E_2$, и по линиям связи начинают протекать уравнивающие токи. Для двигателя с большей скоростью вращения ротора эти токи будут создавать тормозящий момент, а для другого – двигательный. Таким образом, создаваемые моменты будут действовать как согласующие. Такая схема имеет высокую надежность, низкую стоимость, проста в наладке и обслуживании.

Отличительной особенностью работы рассматриваемой схемы является независимость согласующего момента от скорости, так как он зависит только от абсолютной разности скоростей вращения.

Переходные процессы согласования скоростей вызваны различием ЭДС на свободных обмотках двигателей. Это позволяет сделать вывод,

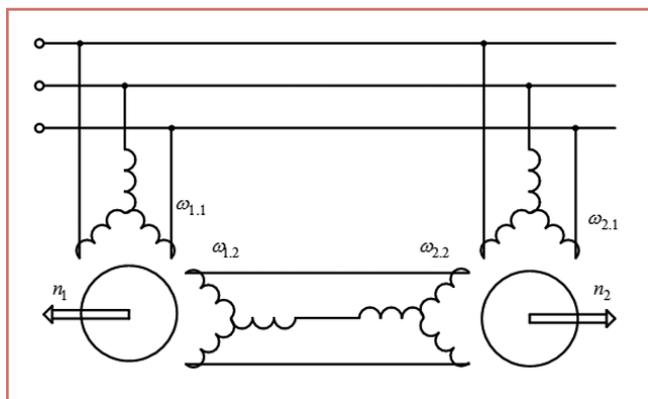


Рис. 1. Схема включения обмоток машин системы.

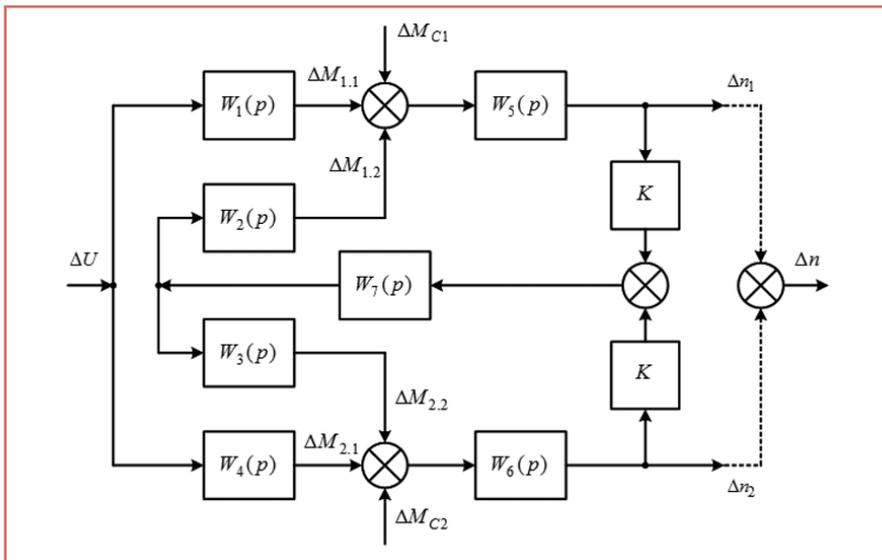


Рис. 2. Структурная схема системы согласованного по скорости вращения АД.

что работа схемы аналогична системе управления АД изменением напряжения на статоре [2, 3, 4]. На основании этого была составлена схема системы согласованного по скорости вращения АД (рис. 2).

Анализ такой системы из-за сложности описания АД затруднен. При пуске и регулировании напряжения АД присутствуют слабозатухающие колебания момента и скорости. В этом случае передаточную функцию АД можно приближенно представить в виде

$$W_{АД}(p) = \frac{\Delta M_{д}(p)}{\Delta U_1(p)} = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_0^2 p^2 + 2\gamma_1 T_0 p + 1)}$$

где T_1 – постоянная времени, характеризующая апериодическую составляющую момента; T_0 – постоянная времени затухания периодической составляющей; γ_1 – коэффициент демпфирования.

На структурной схеме (рис. 2)

$$W_{АД}(p) = W_1(p) = W_2(p) = W_5(p) = W_4(p)$$

Передаточная функция, связывающая момент и скорость, с учетом вентиляторной нагрузки имеет вид

$$W_M(p) = \frac{K_M}{T_M p + 1}$$

Соответственно, на структурной схеме

$$W_M(p) = W_5(p) = W_6(p)$$

На свободных обмотках ДСАД наводятся ЭДС E_1 и E_2 , пропорцио-

нальные скоростям n_1 и n_2 , на схеме это звенья с коэффициентами K . Разность ЭДС приводит к появлению уравнительного тока, протекающего через свободные обмотки двигателей. При этом внутренние падения напряжения на обмотках и их постоянные времени учитываются звеном

$$W_7(p) = \frac{K_7}{T_7 p + 1}$$

Считаем, что система работает в установившемся режиме $n_1 = n_2$ и $E_{1,2} = E_{2,2}$. Кроме этого, принимаем, что $T_{M1} = T_{M2}$. При этом схема становится полностью симметричной по

отношению к выходным координатам Δn_1 и Δn_2 . Определим передаточную функцию

$$W_{n1}(p) = \frac{\Delta n_1(p)}{\Delta M_{с1}(p)} = W_5(p) \frac{1 + W_2(p)W_5(p)W_7(p) \cdot K}{1 + 2 \cdot W_2(p)W_5(p)W_7(p) \cdot K} \quad (1)$$

На основании структурной схемы в программном комплексе MBTU была составлена модель системы согласованного вращения (рис. 3).

На рис. 4 приведены результаты моделирования. За первую секунду происходит разгон двух двигателей, при этом $n_1 = n_2$. В момент $t = 1$ сек возрастает момент на первом двигателе, и скорость n_1 снижается. Одновременно с этим происходит снижение n_2 . На этом же графике приведено значение Δn .

Для сравнения было проведено моделирование этой же схемы без компенсирующих связей (рис. 5). Видно, что скорость n_2 не изменяется, а снижение n_1 более существенно. В то же время анализ полученных переходных процессов показывает, что рассматриваемая система – статическая. Поэтому для более полной компенсации $\Delta n = n_1 - n_2$ необходимо увеличить коэффициент в контуре компенсации.

Следующий шаг – осуществление пуска двухдвигательной системы с условием, что моменты инерции различаются в два раза. Из ос-

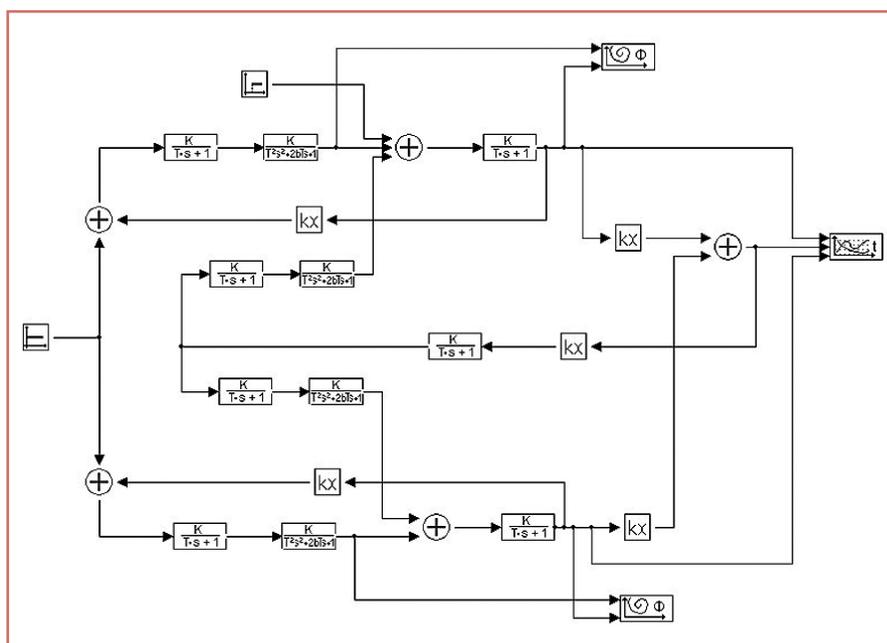


Рис. 3. Модель системы согласованного по скорости вращения АД.

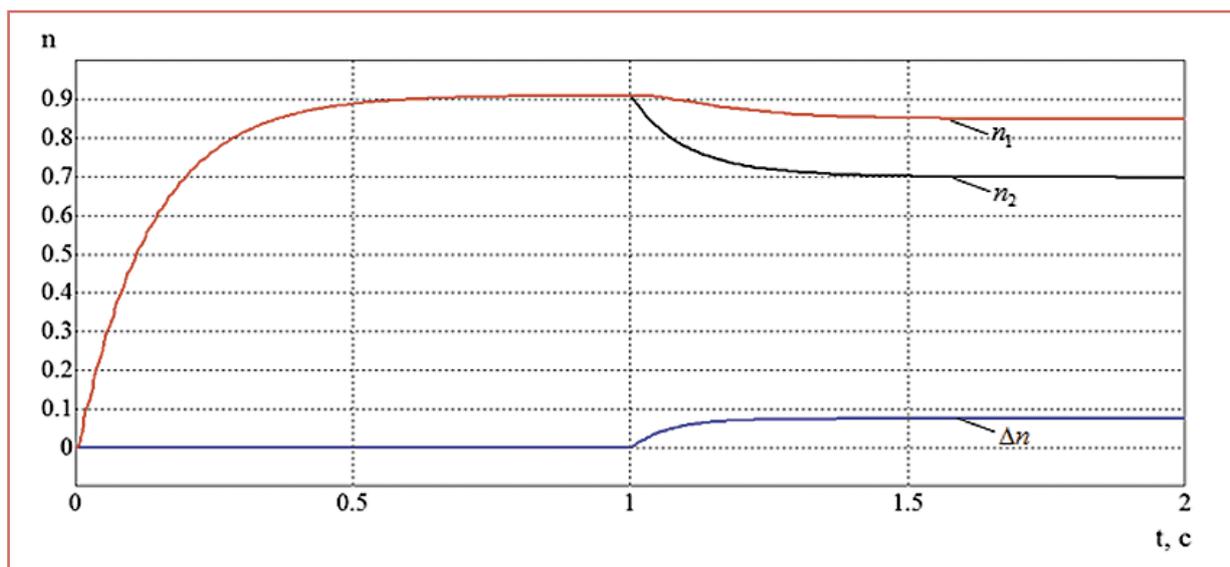


Рис. 4. Переходные процессы пуска и наброса нагрузки на первый двигатель.

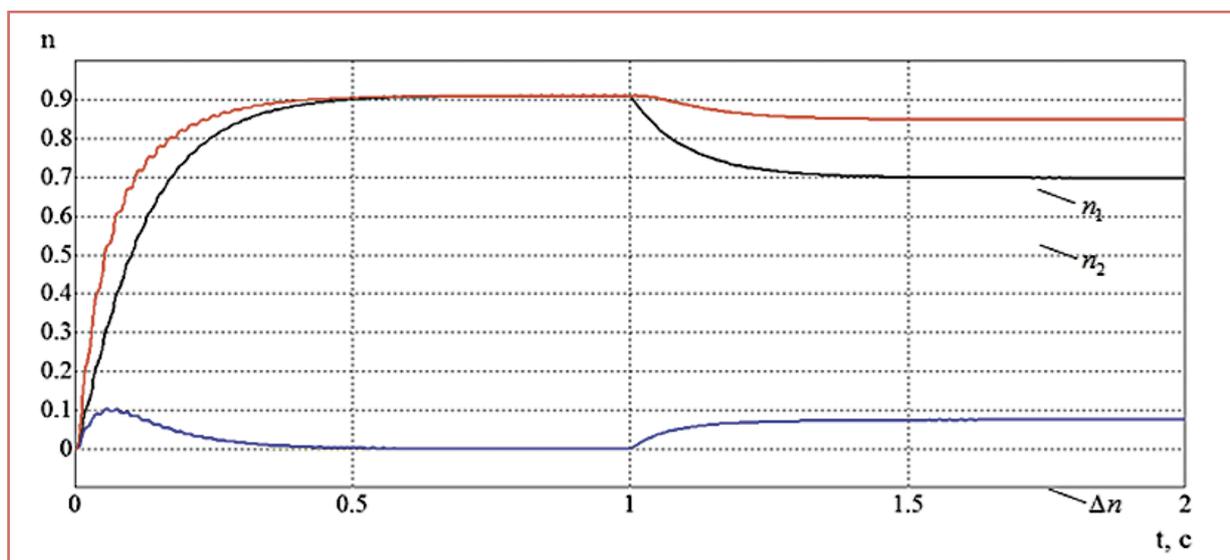


Рис. 5. Переходные процессы пуска и наброса нагрузки на первый двигатель при обрыве цепи синхронизации.

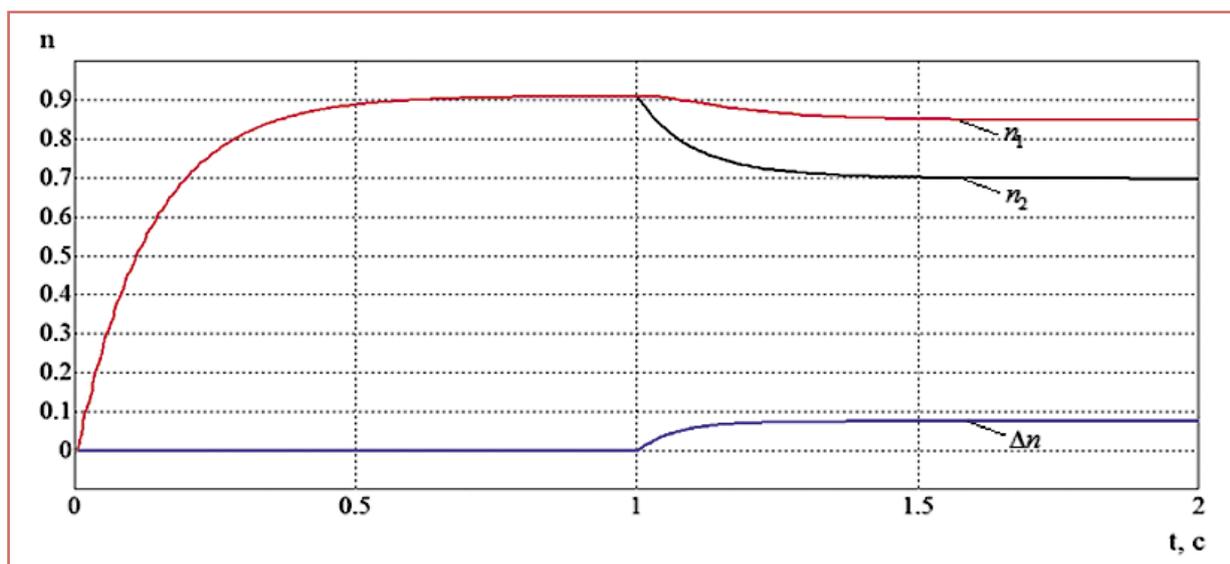


Рис. 6. Переходные процессы пуска и наброса нагрузки для электроприводов с разными значениями момента нагрузки.

циллограмм (рис. 6) можно сделать вывод, что есть различия для режима пуска, а наброс нагрузки отрабатывается так же, как и в первом случае.

В подобных электроприводах необходимо решить две задачи [5, 6]:

- создать систему с минимальными статическими ошибками Δn_1 и Δn_2 при действии моментов нагрузки ΔM_{C1} и ΔM_{C2} ;

- выполнить настройку таким образом, чтобы разность ошибок $\Delta n = \Delta n_1 - \Delta n_2$ была минимальной.

Выполнение первой задачи косвенно решает и вторую – чем меньше статические ошибки электроприводов системы, тем меньше разность этих ошибок. Для снижения статических ошибок увеличивают контурный коэффициент системы и применяют дополнительные корректирующие связи. Это говорит о том, что только параметрическими методами эту задачу решить нельзя.

Приведенный анализ позволяет сделать вывод, что для обеспечения согласованной работы многодвигательных электроприводов грузоподъемных механизмов возможно применение параметрических СЭП на базе ДСАД с разделенными статорными обмотками.

Литература:

1. Доманов В.И. Параметрическая автоматизация двухскоростного асинхронного двигателя / В.И. Доманов, А.В. Доманов, С.В. Гаврилова // Промышленные АСУ и контроллеры, 2015. № 3. С. 3–7.
2. Волков Н.И. Электромашинные устройства автоматики / Н.И. Волков, В.П. Милвзорков. – М.: Высш. шк., 1986. – 335 с.

3. Елисеев В. А. Системы непрерывного управления электроприводов переменного тока. М.: Мос. энерг. ин-т, 1985. – 96 с.

4. Унгуру Ф., Иордан Г. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей. Л.: Энергия, 1971. – 182 с.

5. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

6. Гаврилова С.В. Новые перспективы грузоподъемных механизмов / Электротехнические и электромеханические системы: Материалы I Крымской студ. научно-техн. конференции, г. Севастополь, 15–17 апреля 2014 / Севастоп. нац. тех. ун-т. – Севастополь: СевНТУ, 2014. – С. 31.

Доманов Виктор Иванович – родился в 1950 году. Окончил в 1972 году Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». В 1980 году защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Методика расчета и исследования следящих систем с устройствами упреждающей коррекции для токарных станков с ЧПУ». Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет 144 научных труда, автор 16 изобретений.

Доманов Андрей Викторович – родился в 1976 году. Окончил в 1999 году Ульяновский государственный технический университет по специальности «Измерительно-вычислительные комплексы и системы». В 2002 году защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Разработка и исследование электроусилителя рулевого управления легковых автомобилей на основе бесконтактных двигателей». Кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Научно-исследовательского технологического института УлГУ. Имеет 107 научных трудов, автор 11 изобретений.

Гаврилова Светлана Владимировна – родилась в 1990 году. Окончила в 2014 году Ульяновский государственный технический университет по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов». Аспирант по направлению подготовки «Электротехнические комплексы и системы» энергетического факультета УлГТУ. Имеет 11 научных трудов, автор 2 изобретений.

Domanov Viktor – was born in 1950. In 1972 he graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute specializing in «Aircraft instrumentation». In 1980 has protected Ph. D. thesis by the theme «The method of calculation and research tracking systems with pre-emptive corrective devices for lathes numerically controlled». Ph. D., docent of sub-facility «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has 144 scientific publications, author of 16 inventions.

Domanov Andrey – was born in 1976. In 1999 he graduated from Ulyanovsk State Technical University specializing in «The measuring-computing complexes and systems». In 2002 has protected Ph. D. thesis by the theme «Development and investigation of electrical power steering of passenger cars on the basis of contactless engines». Ph. D., docent, Deputy Director of Scientific-Research Technology Institute of Ulyanovsk State University. He has 107 scientific publications, author of 11 inventions.

Gavrilova Svetlana – was born in 1990. In 2014 he graduated from Ulyanovsk State Technical University specializing in «Electric drives and automation of industrial installations and technological complexes». Postgraduate in the specialty «Electrical Complexes and Systems» Power faculty USTU. She has 11 scientific publications, author of 2 inventions.

Современный методико-алгоритмический аппарат измерения качества комплекса электрооборудования автомобилей

// A modern method-algorithmic quality measuring device of the electric equipment set of cars //

Козловский В. Н., д.т. н.,
Пьянов М. А., к.т. н., Полякова Е. В.,
ПВГУС, г. Тольятти

Ютт В. Е., д.т. н., профессор,
МГТУ «МАДИ», г. Москва

Заятров А. В., к.т. н.,
ТГУ, г. Тольятти

В работе представлены результаты разработки нового аналитического комплекса измерения качества автомобилей и системы электрооборудования. Ключевые слова: качество, надежность, электрооборудование, автомобиль.

The work describes results of development of a new analytical set of car quality measuring and electric equipment system. Keywords: quality, reliability, electric equipment, car.

Сегодня уже не требует доказательств тезис о том, что качество продукции и удовлетворенность потребителей являются самыми важными составляющими оценки конкурентоспособности предприятия [1, 2]. Усиление конкуренции как на мировом, так и на внутреннем автомобильном рынке России, которое мы наблюдаем последнее десятилетие, требует от компаний-производителей постоянной реализации новых подходов, направленных на повышение удовлетворенности потребителей качеством автомобилей [4, 10]. Одной из наиболее значимых составляющих указанной проблемы является необходимость совершенствования методико-алгоритмического аппарата измерения качества автомобилей в эксплуатации исходя из существующего и перспективного уровней технологии сбора и обработки аналитической информации.

В условиях, когда для многих российских предприятий статистика отказов продукции в период эксплуатации является единственной доминантой в вопросах планирования качества, говорить об эффективности процесса стратегического развития конкурентоспособности, да и о полноценной реализации одного

из основополагающих принципов менеджмента качества – ориентации на потребителей – нужно очень осторожно [6].

Повышение эффективности аналитических процессов измерения качества в автомобилестроении сегодня заключается в реализации алгоритмов комплексной оценки удовлетворенности потребителей качеством продукции, базирующейся на процессах сбора и обработки информации, поступающей из широкого спектра источников, к числу которых относятся корпоративные электронные базы данных по отказам автомобилей, регистрируемым на предприятиях фирменного автосервиса (гарантийная база); электронные базы данных по обратной связи с потребителем и горячих линий; аналитические данные результатов анкетирования потребителей по вопросам удовлетворенности продукцией и услугами (база по удовлетворенности); данные специализированных интернет-форумов и клубов любителей автомобильной техники; данные средств массовой информации (СМИ) [5, 11].

Исследование комплексной оценки удовлетворенности потребителей включает в себя два основных эта-

па. Первый этап сводится к количественной оценке степени взаимосвязи между показателями качества и удовлетворенности по трем базам данных: гарантийной базе, базе по удовлетворенности и по базе обратной связи с потребителями. Поскольку, по объективным причинам, не всегда удается обеспечить достаточный для количественной оценки объем информации, поступающий из СМИ и сети «Интернет», то данные из этих источников служат в качестве инструментов дополнительного подтверждения сделанных выводов.

Второй этап связан с проведением перекрестного (качественного) анализа полученных показателей. Данный подход заключается в объединении данных из всех информационных источников и рассмотрении позиций качества по каждому информационному каналу. Подобный подход может быть использован при анализе показателей качества как по системам автомобиля, так и по всей компонентной базе.

Нужно отметить, что объектом исследования является одна из самых популярных в России марок легковых автомобилей. Для проведения аналитических работ нами накоплены данные в виде электронных баз по соответствующим информационным направлениям за 2013 год.

Анализ связи между электронными базами проведен с использованием коэффициента корреляции Пирсона (1)

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N (K_i E_i) - \sum_{i=1}^N K_i \sum_{i=1}^N E_i}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N K_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N K_i \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N E_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N E_i \right)^2 \right)}} \quad (1)$$

где N – количество позиций в исследуемом массиве систем автомобиля;

K_i – значение индекса качества (уровень отказов автомобилей

Таблица 1. Коэффициенты корреляции для систем автомобиля.

Наименование системы	Коэффициент корреляции, r		
	Гарантийная база данных	База данных по удовлетворенности	База данных «Обратная связь»
Гарантийная база данных		0,718	
База данных по удовлетворенности			0,821
База данных «Обратная связь»	0,937		

по гарантийной базе данных),%;
 E_i – значение индекса удовлетворенности: уровень жалоб, относящихся к качеству, по базе данных обратной связи с потребителями; уровень удовлетворенности качеством по базе данных результатов анкетирования потребителей, %.

В соответствии с представленной структурой анализа был произведен расчет коэффициентов корреляции для основных систем автомобиля. Результаты расчетов сведены в таблице 1.

Все представленные в таблице 1 значения коэффициента превышают критические при вероятности ошибки менее 5%. Это позволяет признать полученные показатели статистически значимыми и свидетельствующими о наличии взаимосвязи между разнородными источниками информации. При этом самый низкий коэффициент наблюдается между показателями гарантийной базы данных и базы данных по удовлетворенности. Причинами могут быть следующие факторы. Во-первых, не всем проблемам, по которым высказывались владельцы автомобилей, в гарантийной базе есть соответствующий кодификатор неисправности или отказа. Кроме того, в гарантийной базе отсутствуют позиции, относящиеся к расходным материалам: свечи зажигания, лампы и т.п. Во-вторых, количество проанкетированных владельцев, даже с учетом превышения минимального порога опрошенных для получения достоверных источников, существенно ниже количества проанализированных записей по гарантийной базе за тот же период времени. В связи с этим данные по гарантийной базе более сбалансированы. В-третьих, необходимо учитывать, что в базу удовлетворен-

ности, помимо непосредственно отказов и поломок, вошли также те позиции, которые отражают удовлетворение владельца качеством функционирования транспортного средства исходя из его собственных ожиданий, которые не всегда могут быть удовлетворены в полной мере. В-четвертых, часть проблем с автомобилем, не связанная с серьезным нарушением его работоспособности (например, как при возникновении блокирующих отказов) или влекущая незначительные затраты на их устранения, может быть устранена владельцем самостоятельно или без обращения в официальное предприятие сервисно-сбытовой сети. В данном случае информация в гарантийной базе данных по указанным позициям будет отсутствовать.

Более высокий коэффициент корреляции между базой данных по удовлетворенности и информационной системой «Обратная связь» показывает, что данные, формируемые на основе отзывов потребителей, тесно связаны между собой. При этом не слишком высокое значение коэффициента также может быть связано с малым количеством проанкетированных по базе удовлетворенности, что не позволило в полной мере оценить весь спектр возникших у потребителей проблем.

Самый высокий из полученных коэффициентов принадлежит показателю между данными из гарантийной базы и системы обратной связи с потребителем. С одной стороны, с учетом ранее указанных причин этот показатель должен был бы оказаться меньше полученного. Тем не менее общей чертой обоих информационных каналов является значительно большее количество обращений, отзывов, записей об отказах, что более ярко демонстрирует весь спектр проблем, возникших у потребителей в период эксплуатации транспортного средства.

Сопоставление данных, полученных из разных информационных источников, возможно не только

Таблица 2. Системный анализ проблем качества и надежности автомобиля.

Наименование системы	Положение системы в рейтинге			Средняя позиция	Размах положений
	Г БД	БД У	БД ОС		
Система электрооборудования	1	1	1	1	0
Двигатель внутреннего сгорания	2	4	2	2	2
Кузов	4	2	3	3	2
Система подвески	3	5	4	4	2
Коробка переключения передач	5	3	5	4	2
Система отопления салона	12	9	6	9	6
Топливная система	14	13	7	11	7
Рулевой механизм	9	10	8	9	2
Ступица	7	14	9	10	7
Система охлаждения ДВС	8	6	10	8	4
Тормозная система	11	8	11	10	3
Система выпуска отработавших газов	13	12	12	12	1
Система сцепления	10	7	13	10	6
Система привода	6	11	14	10	8

Таблица 3. Системный анализ проблем качества и надежности автомобиля по результатам анализа СМИ и сети «Интернет».

Наименование системы	Отзыв в СМИ	Упоминание в сети «Интернет»
Система электрооборудования	+	+
Двигатель внутреннего сгорания		+
Кузов	+	+
Система подвески	+	+
Коробка переключения передач		+
Рулевой механизм		+
Тормозная система	+	

с помощью количественной оценки с использованием корреляции. Можно также воспользоваться и так называемым перекрестным методом анализа. Рассмотрение данного направления и есть второй этап комплексной оценки удовлетворенности потребителей качеством продукции. Данное направление сводится не к количественному анализу, а к качественному подходу, основанному на сопоставлении занимаемых позиций в рейтинге отказов, удовлетворенности в каждой из баз данных. Это связано с тем, что количественные характеристики не всегда отражают имеющуюся связь, что вызвано, в том числе, и перечисленными выше причинами, связанными с принятыми ограничениями при формировании баз данных. Предлагаемый подход как раз дополняет используемые методы анализа.

Каждой системе автомобиля присваивается порядковый номер. В таблице 2 сведены обобщенные данные, представляющие собой массив позиций каждой из систем автомобиля по трем базам данных: гарантийная база данных по отказам – Г БД, база данных удовлетворенности – БД У, база данных по системе «Обратная связь» – БД ОС. Далее вычисляется усредненная позиция каждой из систем по трем информационным каналам и вычисляется разброс, то есть максимальная разница между позициями каждой из систем в рейтинге.

В дополнение к данным, представленным в таблице 2, не стоит пренебрегать и наиболее важными проблемами, волнующими потребителей по результатам анализа СМИ и сети «Интернет». В этой связи в таблице 3 сведены проблемы, наибо-

лее часто вызывающие неудовлетворенность владельцев автомобилей, но без учета принадлежности к расположению в позиционном рейтинге. Символ «+» означает, что потребители часто сталкиваются с указанной проблемой [10, 11].

Проанализируем представленные в таблицах 2 и 3 данные. Явным лидером по количеству отказов и возникших проблем является система электрооборудования, которая стабильно занимает первую позицию по всем проанализированным информационным каналам. Далее располагаются двигатель внутреннего сгорания, кузов, система подвески и коробка переключения передач. Расположение всех этих систем практически не изменяется при переходе к анализу по различным информационным источникам, о стабильности занимаемых ими позиций также свидетельствует и небольшое значение размаха занимаемых положений в каждом из них. Кроме того, нельзя не отметить тот факт, что подобная ситуация справедлива не только для систем автомобиля, возглавляющих рейтинг, но также и для остальных, например, системы

выпуска отработавших газов, рулевого механизма. Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что проведенное подобным образом исследование по совместной оценке качества и надежности автомобиля не только является правдоподобным, но и заслуживает право на дальнейшее совершенствование и активное внедрение методики в работу аналитических служб качества автопроизводителей.

Убедившись в эффективности совместного рассмотрения различных информационных источников с точки зрения анализа качества продукции и удовлетворенности потребителей, проведем перекрестный анализ проблем компонентной базы автомобиля применительно к системе электрооборудования. В таблице 4 сведены занимаемые позиции отдельных устройств исходя из топ-10 наиболее проблемных устройств, относящихся к электрооборудованию [10, 11].

Как следует из представленной таблицы 4, вершина рейтинга остается за лампами, преждевременный выход из строя которых возникает у владельцев очень часто, однако данный факт никак не отражается в гарантийной базе данных вследствие ряда ограничений данного информационного источника, вызванных официальной позицией автопроизводителя по данному изделию как по расходному материалу. Отдельного внимания требует то, что практически все позиции, которые удалось выделить из совокупного анализа, занимают устройства, имеющие в своем составе электромеханические преобразователи. Это позволяет выделить данную группу устройств как ключевую и формирующую общий

Таблица 4. Системный анализ проблем качества и надежности системы электрооборудования автомобиля.

Наименование устройства	Информационный источник				
	Г БД	БД У	БД ОС	СМИ	Интернет
Лампы	-	1	2	+	+
Электростеклоподъемник	3	2	9		+
Генераторная установка	2	3	8	+	+
Регулятор холостого хода	6	6	-		+
Электроусилитель рулевого управления	1	7	4		+
Электродвигатель вентилятора отопителя	4	8	-		

рейтинг системы электрооборудования. При этом большие расхождения между занимаемыми позициями не стоит рассматривать как отсутствие взаимосвязи среди выделенных устройств. Это зачастую связано с особенностями формирования каждого из информационных массивов данных. В результате может иметь место как недостаточное количество исходных данных, так и не обработанная до совершенства структура интерпретируемых данных. Совместное рассмотрение информации позволяет уйти от большинства недостатков, присущих каждому информационному источнику в отдельности.

Ранее неоднократно подтверждалась особая значимость системы электрооборудования как по отдельным информационным каналам, так и в случае совместного рассмотрения комплекса показателей качества, надежности и удовлетворенности [1]. Кроме того, не стоит забывать, что количество компонентов, составляющих данную систему, постоянно увеличивается, они входят в состав других систем автомобиля, обеспечивая повышение их функциональных возможностей. Таким образом, значимость системы электрооборудования будет только возрастать, тем самым для эффективной работоспособности автомобиля необходимо мероприятия по улучшению надежностных характеристик проводить в первую очередь для ключевых элементов системы электрооборудования.

Однако не стоит забывать, что вновь внедряемое на автомобили оборудование может достигать 20–30% от ранее апробированного и исследованного. В этом случае для новых проектов автомобилей возникает задача тщательного прогнозирования показателей качества и надежности для новой комплектации продукции. Однако оценка характеристик для будущих компонентов автомобиля возможна только на заключительных стадиях проектирования. В связи со сложной ситуацией, связанной с конкуренцией между автопроизводителями, происходит постоянное сокращение сроков разработки и внедрения новых компонентов на выпускаемые модели. К сожалению, даже с учетом проведения анализа компьютерных моделей новых конструкций изделий

и их первичных испытаний образцов не всегда удается в полной мере спрогнозировать параметры работоспособности устройства в автомобиле в период его эксплуатации [3, 9]. И несмотря на то что большая часть номенклатуры остается прежней, внедряемые разработки не должны снижать показатели качества и надежности всего автомобиля. В этом случае ценнейшей информацией являются данные, поступающие в период гарантийной эксплуатации [7, 8].

При этом одной из важнейших задач анализа и оценки качества и надежности является процесс выявления причин возникновения отказов и нарушений работоспособности. Не стоит упускать из рассмотрения и такой важный компонент, как объемы затрат, требуемых для обнаружения и устранения возникших проблем. Это связано с тем, что в случае возникновения отказов среди компонентов с малыми показателями надежности, особенно в период гарантийной эксплуатации автомобиля, производители не только несут имиджевые потери, но и материальные, связанные с заменой или ремонтом отказавших устройств. Особенно это актуально для сложных в техническом плане, а следовательно, и дорогостоящих устройств, к которым, несомненно, относятся элементы системы электрооборудования, имеющие в своем составе электромеханические преобразователи.

Главным результатом реализации комплексной оценки удовлетворенности потребителей является формирование принципиально нового подхода к организации процесса мониторинга и вскрытия ключевых проблем качества и удовлетворенности потребителей. За счет наполнения банка данных аналитической информацией из разных источников с достаточно высоким уровнем схожимости появляется возможность исследования качества под разным углом, например, с точки зрения надежности или удовлетворенности, или информационной обеспеченности. При использовании разработанного инструмента появляется возможность для обеспечения быстрой реакции со стороны автопроизводителя при изменении базовых требований потребительского рынка, относящихся не

только к надежности, но и к комфорту, дизайну, а главное – комплексный анализ позволяет расширять границы перспективного планирования качества продукции.

Статья выполнена в рамках работы над грантом Президента РФ по поддержке молодых ученых – докторов наук на 2014–2015 гг., МД-2782.2014.8.

Литература:

1. Козловский В. Н. Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности системы электрооборудования автомобилей / В. Н. Козловский, А. В. Зятров // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 1.
2. Козловский В. Н. Обеспечение качества и надежности электрооборудования автомобилей: монография / В. Н. Козловский. – Тольятти: ГОУ ВПО «ТГУ». – 2009–274 с.
3. Козловский В. Н. Моделирование электрооборудования автомобилей в процессах проектирования и производства [Текст] / В. Н. Козловский. – Тольятти: ГОУ ВПО «ТГУ». – 2009. – 227 с.
4. Козловский В. Н. Аналитические исследования качества автомобилей в эксплуатации: монография / В. Н. Козловский, В. И. Строганов. Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH & Co., Deutschland, 2013.
5. Козловский В. Н. Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей: монография [Текст] / В. Н. Козловский, Д. И. Панюков. Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH & Co., Deutschland, 2014.
6. Козловский В. Н. Анкетные исследования воспринимаемого потребителем качества автомобилей / В. Н. Козловский, Д. И. Панюков, С. И. Клейменов // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 6.
7. Пионтковская С. А., Пьянов М. А. Прогнозирование отказов автомобильного электрооборудования / С. А. Пионтковская, М. А. Пьянов // Вектор науки тольяттинского государственного университета. 2011. № 1.
8. Пионтковская С. А., Ермаков В. В., Пьянов М. А. Влияние электрооборудования на безопасность автотранспортного средства / С. А. Пионтковская, В. В. Ермаков, М. А. Пьянов // Грузовик. 2011. № 6.
9. Строганов В. И. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: монография [Текст] / В. И. Строганов, В. Н. Козловский. – МАДГТУ «МАДИ» – 2014. – 264 с.

10. Строганов В.И. Итоги и перспективы развития электромобилей и автомобилей с гибридными силовыми установками / В.И. Строганов, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 2.

11. Строганов В.И. Инновационные методы исследования качества и надежности электромобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой: монография / В.И. Строганов, В.Н. Козловский. – М: «МАДИ», 2012.

Козловский Владимир Николаевич – инженер по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов», в 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт. Доктор технических наук. В 2010 году защитил докторскую диссертацию на тему: «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Автор более 180 научных работ, в том числе десяти монографий. В настоящее время работает профессором в Поволжском государственном университете сервиса.

Пьянов Михаил Александрович – окончил Тольяттинский государственный университет, инженер по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». В 2006 году защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Диагностика системы электрооборудования легковых автомобилей». В настоящее время работает доцентом на кафедре «Современное естествознание» ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса». Автор 45 статей и одной монографии. Имеет один патент на изобретение.

Полякова Екатерина Владимировна – окончила Поволжский государственный университет сервиса по специальности «Бытовые машины и приборы». С 2012 года работает ассистентом на кафедре «Общепрофессиональные дисциплины» ФГБОУ ВПО

«Поволжский государственный университет сервиса». Автор 14 статей.

Ютт Владимир Евсеевич – родился в 1940 году. В 1962 году окончил Московский автомеханический институт по специальности «Инженер-механик». В 1967 году защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Электропусковые системы», в 1980 году – докторскую диссертацию по теме: «Диагностика электрооборудования автомобилей». Имеет ученое звание профессора. Опыт работы – 51 год. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электротехника и электрооборудование» Московского автомобильно-дорожного института (ГТУ). Имеет более 200 научных трудов, патентов. Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный работник высшей школы, награжден двумя медалями.

Заятров Алексей Викторович – в 2010 году окончил Тольяттинский государственный университет по специальности «Электрооборудование автомобилей и электромеханика». В настоящее время работает руководителем лаборатории в научно-исследовательском отделе «Электронные системы контроля» университета, где занимается перспективными вопросами обеспечения качества и надежности электрооборудования автомобилей в период эксплуатации. Автор более 20 научных статей.

Kozlovskiy Vladimir – is an engineer, specialization is «Car and tractor electric equipment», in 1999 he graduated from Tolyatti Polytechnic Institute. Doctor of Engineering. In 2010 he defended a Dphil, the theme is: «Quality and safety assurance of car electric equipment system». The author of more than 180 scientific works, including 10 monographs. At present he is a professor in Povolzhye State Service University.

Pyanov Mikhail – has graduated from Tolyatti State University, he is an engineer with spe-

cialization in «Electrical equipment of cars and tractors». In 2006 he defended a master's dissertation in «System diagnostics of electrical equipment of passenger cars». At present he works as lecturer at the department «Modern natural science» in FGBOU VPO «Povolzhskiy Service State University». He has 45 articles, including one monographs.

Polyakova Ekaterina – graduated from Volga Region State University of Service with specialization in «Household machines and devices». Since 2012 she has been working as assistant at the department «General professional subjects» in FSBEI HPO «Volga Region State University of Service». She is an author of 14 articles.

Jutt Vladimir – was born in 1940. In 1962 he graduated from The Moscow Automotive Institute by specialty «Mechanical engineer». In 1967 has protected Ph. D. thesis by the theme «Electro starting systems», in 1980 the thesis for a Doctor's degree by the theme «Car's electric equipment diagnostics». He has academic status of professor. Operational experience of 51 years. Now Vladimir works as head of sub-faculty of «Electrical engineer and electric equipment» in Moscow Road-transport Institute (State Technical University). He has more than 200 names of proceedings, patents. Honored worker of science and engineering of Russian Federation, the Honorable worker of Higher school, conferred by two medals.

Zayatov Aleksey – in 2010 he graduated from Tolyatti State University, speciality is «Automobile electric equipment and electromechanics». At present he works as the leading engineer in the research department «Electronic control systems» in the university, where he deals with perspective questions of automobile electric equipment quality supply and safety during operation period. The author of more than 20 scientific works.

О выплате вознаграждения авторам изобретений, полезных моделей и других результатов интеллектуальной деятельности, созданных при выполнении финансируемых Российским научным фондом научных, научно-технических программ и проектов

Порядок выплаты вознаграждения авторам изобретений, полезных моделей и других результатов интеллектуальной деятельности определен «Положением об осуществлении государственным заказчиком от имени Российской Федерации полномочий лицензиата в случае использования для государственных нужд результатов интеллектуальной деятельности, созданных при выполнении финансируемых российским научным фондом научных, научно-технических программ и проектов», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 6 сентября 2014 г. № 914.

Правообладатель результата интеллектуальной деятельности, созданного при выполнении программ и проектов, по требованию государственного заказчика обязан предоставить ему право использования результата интеллектуальной дея-

тельности для государственных нужд на условиях безвозмездной простой (неисключительной) лицензии.

В лицензионный договор, заключаемый государственным заказчиком и правообладателем, должны быть включены сведения об авторе (авторах) результата интеллектуальной деятельности в целях выплаты ему вознаграждения.

Выплата автору (авторам) результата интеллектуальной деятельности вознаграждения за использование результата интеллектуальной деятельности в рамках лицензионного и (или) сублицензионного договоров осуществляется государственным заказчиком ежегодно, исчисляя с даты заключения лицензионного договора, в течение месяца после истечения каждого года.

Вознаграждение выплачивается каждому автору результата интеллектуальной деятельности и должно быть не меньше средней заработной

платы по Российской Федерации за календарный год, предшествующий выплате вознаграждения, определяемой по данным Федеральной службы государственной статистики. В случае использования результата интеллектуальной деятельности по нескольким сублицензионным договорам такое вознаграждение выплачивается по каждому из сублицензионных договоров.

Выплата вознаграждения производится за счет доходов, полученных государственным заказчиком или сублицензиатом от реализации товаров (услуг) с использованием результата интеллектуальной деятельности, или средств, полученных государственным заказчиком от заключения сублицензионного договора.

Краснов Л. А.
Редакция журнала
«Электроника и электро-
оборудование транспорта»

О предоставлении субсидий Фонду содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере

Постановлением Правительства Российской Федерации от 25 сентября 2014 г. № 981 утверждены Правила предоставления субсидий из федерального бюджета федеральному государственному бюджетному учреждению «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» на предоставление грантов малым инновационным предприятиям на финансовое обеспечение инновационных проектов, результаты которых имеют перспективу коммерциализации, в рамках подпрограммы «Стимулирование инноваций» государственной программы Российской Федерации «Экономическое развитие и инновационная экономика».

Предоставление грантов малым инновационным предприятиям осуществляется на основании конкурсного отбора таких предприятий в по-

рядке и на условиях, утверждаемых наблюдательным советом фонда.

Критериями конкурсного отбора малых инновационных предприятий, которым предоставляются гранты, являются:

- количество вновь создаваемых и (или) модернизируемых высокопроизводительных рабочих мест в рамках инновационного проекта;
- увеличение объема реализации инновационной продукции, явившееся результатом выполнения заявленного проекта, в том числе патентно-лицензионной деятельности малого инновационного предприятия, финансируемой за счет полученного гранта.

Предоставление грантов осуществляется на основе договоров, заключенных фондом с малыми инновационными предприятиями, на финансовое обеспечение расходов, связан-

ных с реализацией инновационных проектов, результаты которых имеют перспективу коммерциализации.

Договор гранта не может быть заключен с малым инновационным предприятием в случае если:

- а) предприятие находится в процессе ликвидации или реорганизации;
- б) предприятие находится в процедуре банкротства;
- в) предприятие имеет задолженность перед федеральным бюджетом, бюджетом субъекта Российской Федерации;
- г) в отношении предприятия ранее установлен факт неисполнения существенных условий договора гранта.

Краснов Л. А.
Редакция журнала
«Электроника и электро-
оборудование транспорта»

О продлении срока подачи заявления о признании действия исключительных прав, удостоверенных официальными документами Украины

В № 1 нашего журнала за 2015 г. опубликована информация о возможности признания на территории Российской Федерации действия исключительных прав, удостоверенных официальными документами Украины, в случае подачи правообладателем в Роспатент соответствующего заявления. Срок подачи заявления Федеральным законом от 21.07.2014

№ 252-ФЗ «О внесении дополнения в Федеральный закон «О введении в действие части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации» был установлен до 1 января 2015 г. Мы высказали предположение, что возможно этот срок будет продлен. Федеральным законом от 29.06.2015 № 189-ФЗ этот срок действительно продлен до 1 июля 2016 г.

В связи с этим следовать рекомендациям, приведенным в предыдущей информации, необходимо с учетом возможности подачи указанного заявления до 1 июля 2016 г.

Краснов Л. А.
Редакция журнала
«Электроника и электро-
оборудование транспорта»

Научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения»

3 декабря 2015 года состоится научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения».

Организаторы

- Академия электротехнических наук РФ.
- Российская академия наук (отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления).
- Национальный исследовательский университет «МЭИ».
- Ассоциация «Интерэлектромаш».
- Ассоциация «Электрокабель».
- ВНИИ кабельной промышленности (ВНИИКП).

Основные направления и тематика конференции

- Теория электрических машин.
- Электрические машины массовых серий.
- Электрические машины для электрических и гибридных транспортные средств.
- Сверхпроводниковые электрические машины.
- Электрические машины для бытовой техники и электроинструментов.
- Электрические машины специального назначения.
- Электропривод.
- Электроматериалы для электрических машин.
- Сертификация и стандартизация в электромашиностроении.

Оргкомитет

Мещанов Г. И. – д.т.н., первый вице-президент АЭН РФ, генеральный директор ОАО «ВНИИКП», председатель комитета.

Васильев Е. Б. – к.э.н., академик АЭН РФ, генеральный директор ЗАО «ТД ВНИИКП».

Иньков Ю. М. – д.т.н., профессор Московского государственного университета путей сообщения, гл. ученый секретарь АЭН РФ.

Коваленко Л. А. – заведующая отделом ОАО «ВНИИКП», секретарь оргкомитета.

Макаров Л. Н. – д.т.н., академик АЭН РФ, генеральный директор НИПТИЭМ.

Малахов Б. П. – академик АЭН РФ, вице-президент «Интерэлектромаш».

Программный комитет

Бутырин П. А. – д.т.н., член-корреспондент РАН, президент АЭН РФ, директор Института электроэнергетики МЭИ, председатель комитета.

Беспалов В. Я. – д.т.н., академик АЭН РФ, профессор МЭИ.

Макриденко Л. А. – д.т.н., академик АЭН РФ, генеральный директор ВНИИЭМ.

Петреня Ю. К. – д.т.н., член-корреспондент РАН; технический директор ОАО «Силовые машины».

Пешков И. Б. – д.т.н., почетный президент АЭН РФ, председатель совета директоров ОАО «ВНИИКП».

Серебрянников С. В. – д.т.н., профессор, академик АЭН РФ, зав. кафедрой физики и технологии электротехнических материалов и компонентов МЭИ.

Желающим принять участие в конференции необходимо направить доклады или аннотацию докладов с заявкой на участие по адресу:
e-mail: conference@tdvniikp.ru,
тел. 8 (495) 911–82–48.

Срок подачи докладов – 15 октября 2015 года.

Секретарь оргкомитета – Коваленко Людмила Армандовна.

Требования к оформлению текстовых материалов

Требования к оформлению текстовых материалов Вы можете посмотреть на сайте Академии электротехнических наук РФ www.acelsc.ru.

Доклад объемом до 10 стр. представляется в любой версии Microsoft Word. Рисунки можно представлять в любом формате растровой или векторной графики (например, .psx, .tif, .cdr, .jpg и др.). Фотографии могут быть представлены отдельными файлами в любом формате растровой графики.

Рисунки должны быть черно-белыми. Таблицы и формулы представляются без использования сканирования и цветного фона. Размер рисунков и таблиц не должен превышать 165 x 240 мм. Доклад должен содержать индекс УДК, заголовков, записанный прописными буквами, ниже которого также прописными буквами должны быть написаны инициалы и фамилии докладчиков. Материалы, не отвечающие изложенным требованиям, не рассматриваются.

Необходимо также представить реферат доклада (не менее 50 слов) на русском и английском языках, а также ключевые слова. Аннотация доклада должна содержать не менее 100 слов. В сопроводительных документах сообщаются сведения об ученой степени, должности и месте работы всех авторов (соавторов) и необходимая для связи контактная информация.

Доклады и аннотации докладов будут опубликованы в материалах конференции, а лучшие из докладов – и в ведущих российских научно-технических журналах.

Конференция состоится в «ВНИИКП» по адресу г. Москва, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 5, тел. 8 (495) 911–82–48.

Сведения об авторах

д.т.н., профессор
Герман Леонид Абрамович
8-908-769-94-26

д.т.н., профессор
Быкадоров Александр Леонович
8-908-512-24-55

Гарбузов Илья Игоревич
8-916-052-05-88

Кишкурно Константин
Вячеславович
8-903-685-56-45

д.т.н., профессор
Феоктистов Валерий Павлович
8-495-684-24-98

д.т.н., профессор
Овсянников Евгений Михайлович
8-495-223-05-23

д.т.н., профессор
Хорошавин Валерий Степанович
8-909-717-15-91

д.т.н.
Козловский Владимир
Николаевич
8-917-978-83-56

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ И АВТОРСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Рекламные материалы принимаются в форматах «.cdr», «.eps» или «.tif» (300 dpi). Цветовая модель – CMYK. Все шрифты должны быть переведены в кривые.

Авторские материалы. Текст статьи в формате «.doc» (Microsoft Word). Обязательно наличие аннотации, ключевых слов и списка используемой литературы. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык. Все рисунки в форматах «.cdr» или «.eps», фотографии – в формате «.tif» (300 dpi). Каждый рисунок или фотография должны быть представлены отдельным файлом.

СТОИМОСТЬ ГОДОВОЙ ПОДПИСКИ:

(6 номеров) – **6 000 руб.**, в т.ч. НДС 18%

Оформить подписку можно:

– через редакцию – необходимо направить по факсу или электронной почте заявку с указанием банковских реквизитов, наименования организации (фирмы), точного почтового адреса и количества комплектов журнала.

Тел./факс: (495) 500-40-20, 557-23-95,

e-mail: nppte@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2015 г., индекс 59990.

СТОИМОСТЬ РЕКЛАМЫ:

2-я и 3-я страницы обложки – 24 000 рублей

4-я страница обложки – 30 000 рублей

одна страница внутри журнала – 12 000 рублей

Печатные материалы, используемые в журнале, являются собственностью редакции.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Полученные материалы не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право корректорской и редакторской правки публикаций без согласования с авторами.

Журнал распространяется через редакцию по адресной рассылке, через ОАО «Агентство Роспечать», на специализированных выставках и симпозиумах.