

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

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

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

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

Главный редактор:
А.Г. Бабак, к.т.н.

Редакционный совет:

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

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук.

Редакция:

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

Подписано в печать:
___.10.2017 г.

Отпечатано:

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

Формат 60x90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 1190

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Зечихин Б.С., Ковалев К.Л., Пенкин В.Т., Задачин А.В.

Аналитический расчет индуктивных параметров тороидальной высокотемпературной сверхпроводниковой обмотки якоря синхронной электрической машины 2

Гулямов К.Х., Сидоров К.М., Ютт В.Е.

Преимущества использования повышающих преобразователей постоянного напряжения в составе системы тягового электрооборудования перспективных транспортных средств 7

Иващенко В.О., Изварин М.Ю., Леонов А.Е.

Повышение энергоэффективности системы реостатного торможения тепловозов 11

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Доманов В.И., Доманов А.В., Альтахер Аббас А. Карим

Анализ ошибок моделирования асинхронного двигателя 16

Серебряков А.С., Герман Л.А., Осокин В.Л., Субханвердиев К.С.

Анализ методов расчета токов короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ-11 19

Горский А.Н., Чернышева Ю.В.

Анализ колебаний в механических системах на основе аналогий с электрическими цепями 26

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ДАТЧИКИ

Ларченко А.В., Чуйко А.Д.

Трехмерная модель распределения температуры по коллектору двигателя пульсирующего тока 31

Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., Максимов В.В., Цветков А.Н., Гибадуллин Р.Р.

Разработка метода проектирования линейных электрических машин возвратно-поступательного действия на основе топологической оптимизации 34

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Попов Ю.В., Клочков Д.В.

Помехи бортовых устройств регистрации 40

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Николаев П.А., Козловский В.Н., Подгорный А.С.

Испытания автотранспортных средств на устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям 43

ИНФОРМАЦИЯ

Краснов Л.А.

О досудебном порядке урегулирования споров при защите исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности и на средства индивидуализации 47

Аналитический расчет индуктивных параметров тороидальной высокотемпературной сверхпроводниковой обмотки якоря синхронной электрической машины

// An analytical calculation of inductive parameters of toroidal high temperature superconducting armature winding of synchronous electrical machine //

Зечихин Б.С., д.т.н., профессор,
Ковалев К.Л., д.т.н., профессор,
Пенкин В.Т., д.т.н., профессор,
Задачин А.В.,
МАИ (НИУ), Москва

В работе представлены результаты аналитического исследования по расчету индуктивных параметров тороидальной обмотки якоря, выполненной из высокотемпературной ленты первого или второго поколения и предназначенной для использования в полностью сверхпроводниковой синхронной электрической машине. Выявлена оптимальная схема экранирования внешней части обмотки с точки зрения снижения индуктивности и снижения потерь в экранирующих оболочках.

Ключевые слова: полностью сверхпроводниковая синхронная электрическая машина, высокотемпературная сверхпроводящая лента, якорь, тороидальная обмотка, индуктивность, электрические потери, экранирующие оболочки.

Синхронные сверхпроводниковые электрические машины (СПЭМ) кондукционного типа с обмотками на роторе и статоре можно разделить на два класса:

- устройства со сверхпроводящим индуктором и резистивным якорем;
- полностью сверхпроводниковые машины.

This work presents the results of analytical investigation on calculation of inductive parameters of toroidal armature winding which is produced from high temperature superconducting tape of the first generation or the second one to be used in fully superconducting synchronous electrical machine. The optimal scheme of screening for outer part of the winding is obtained both from the point of view to decrease inductance of winding and electrical losses in screening shells.

Keywords: fully superconducting synchronous electrical machine, high temperature superconducting tape, armature, toroidal winding, inductance, electrical losses, screening shell.

К недостаткам первой схемы относится необходимость термоизоляции сверхпроводникового индуктора от «теплого» якоря. Это достигается использованием системы криостатирования, что приводит к увеличению немагнитного зазора между обмотками ротора и статора. Тем не менее именно эта схема

стала успешно разрабатываться в середине 1960-х годов в США (Avco-Everett, MTI, Westinghouse, General Electric и др.), Японии (Mitsubishi, Fuji, Hitachi), СССР, а затем в России (РНЦ Курчатовский институт, ВНИИ электромашиностроения, ФТИНТ, ВНИИЭМ, МАИ).

Второй класс характеризуется охлаждением жидким криоагентом всего агрегата. При этом появляются дополнительные требования к сверхпроводящему проводу обмотки якоря, так как потери на переменном токе промышленной частоты и выше весьма существенны. Развитие этого направления работ позволило в 1983 году создать композитные провода с жилами из Nb-Ti субмикронного диаметра, имеющие малые потери на токах промышленной частоты (50 Гц). Полностью сверхпроводниковая машина обладает повышенной мощностью при меньших размерах и массе. В начале 1990-х годов полностью сверхпроводниковые генераторы мощностью 18...100 кВт были продемонстрированы во Франции (GEC ALSTHOM) и Японии [1, 2, 3, 4].

Разработка высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент первого поколения (1G) на основе соединений висмута $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (обычно обозначается как BSCCO или Bi-2223 с критической температурой $T_c = 104 \text{ K}$, рис. 1), а затем и ВТСП-лент второго

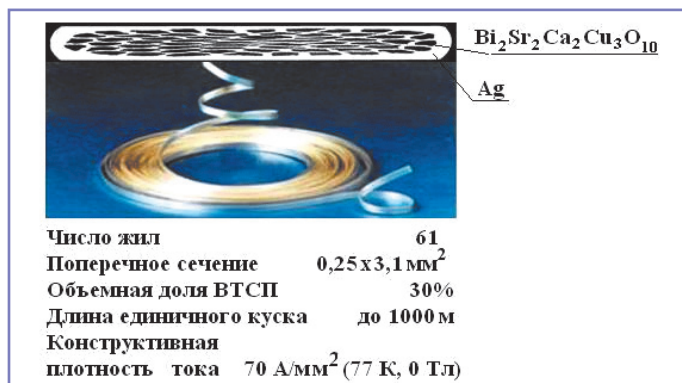


Рис. 1. ВТСП-лента первого поколения производства ВНИИ неорганических материалов им. А.А. Бочвара (Москва, РФ)

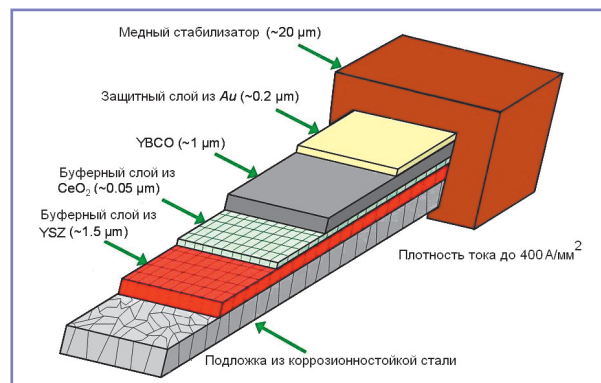


Рис. 2. ВТСП-лента второго поколения производства фирмы BRÜKER HTS GmbH (ФРГ)

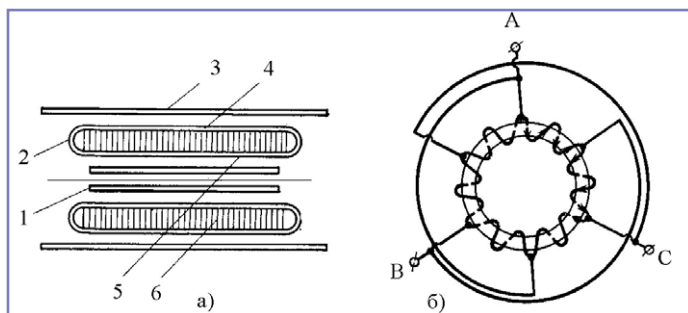


Рис. 3. ССПЭМ с тороидальной обмоткой якоря (а):
1 – ВТСП-индуктор;
2 – лобовая часть тороидальной обмотки;
3 – корпус ССПЭМ;
4 – внешняя часть тороидальной обмотки;
5 – внутренняя часть тороидальной обмотки;
6 – шихтованный ферромагнитный сердечник.
Схема тороидальной обмотки якоря (б)

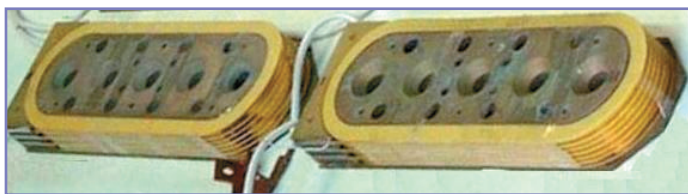


Рис. 4. Рейстрекковые модули, сформированные из двухслойных галет

поколения (2G) на основе соединений иттрия $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (обозначается YBCO или Y-123 с критической температурой $T_c = 92...94$ К, рис. 2) позволяет изготавливать обмотки с охлаждением высококипящими криоагентами (жидкий азот, воздух, аргон, кислород).

Особенностями ВТСП-лент являются анизотропия токонесущих свойств в зависимости от ориентации магнитного поля к поверхности ленты и минимальный радиус изгиба ленты, характеризующий начало деградации из-за механических напряжений в ленте. Также лента не допускает намотку на ребро.

Поэтому находят применение обмотки типа двухслойных галет круглой или рейстрекковой формы (рис. 3). Соответственно, из такой ленты невозможно изготовить распределенную обмотку, размещенную в зубцово-пазовой зоне.

В связи с этим представляет интерес тороидальная обмотка якоря, выполненная в виде предварительно изготовленных рейстрекковых модулей, установленных на разрезном стальном шихтованном сердечнике, являющемся одновременно внешним экраном (рис. 4) [5, 6]. Катушки фазы статора, расположенные диаметрально на тороидальном

магнитопроводе статора, включаются встречно. При этом тороидальная обмотка имеет вдвое больше витков по сравнению с барабанной, что увеличивает индуктивное сопротивление якоря. Однако при типичных значениях конструктивного коэффициента машины $\lambda_f = \frac{l_f}{D_f} \leq 0,5...1$, где l_f и D_f – длина и диаметр ротора, она имеет существенно более короткие лобовые части, а индуктивность внешней части обмотки, расположенной снаружи тора, может быть существенно снижена экранированием (рис. 5). Вопросы расчета таких обмоток в литературе рассмотрены недостаточно полно.

В этой связи рассмотрены варианты выполнения ферромагнитного сердечника с тороидальной обмоткой и дополнительными экранирующими оболочками, представленными на рис. 5.

Определение индуктивных параметров обмотки проводится в предположении, что шихтованный сердечник и дополнительная стальная оболочка ненасыщенны (рис. 5а), их относительные магнитные проницаемости μ_r постоянны, а удельные электропроводности σ равны нулю. Дополнительные

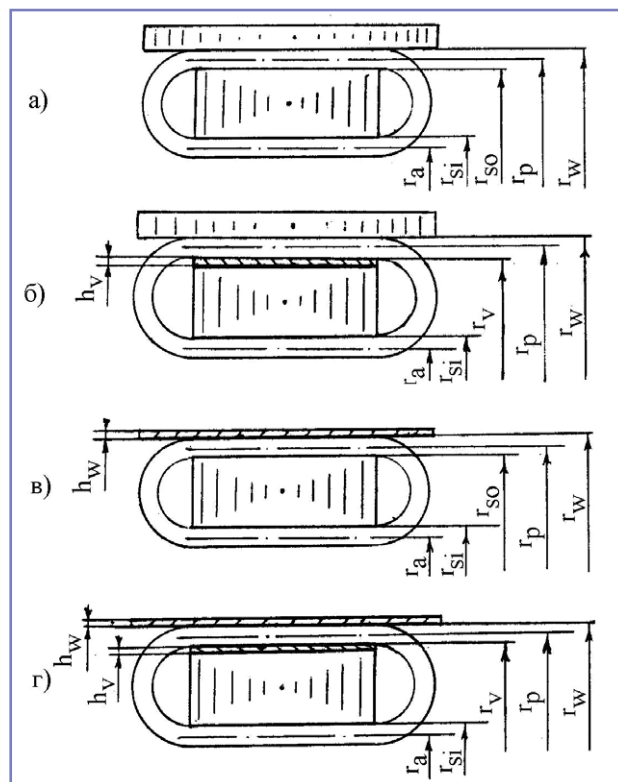


Рис. 5. Конструктивные варианты экранирования внешней части тороидальной обмотки якоря: а) ферромагнитное; б) внутреннее электромагнитное; в) внешнее электромагнитное; г) двухстороннее электромагнитное

электропроводящие оболочки (рис. 5 б, в, г) в области рабочих частот переменного тока имеют толщину, существенно превышающую глубину скин-слоя. В расчетах реальные обмотки заменяются эквивалентными токовыми слоями, распределенными на цилиндрических поверхностях с радиусами r_a и r_p . Линейная часть обмотки якоря, расположенная в активной зоне машины, называется внутренней, часть обмотки вне шихтованного сердечника – внешней.

Аналитические зависимости для расчета индуктивных параметров тороидального якоря

В [7] в двумерной постановке задачи получено решение для векторного магнитного потенциала $A(0,0, A_z(r, \varphi))$ токового слоя, протекающего в немагнитном зазоре между коаксиальными стальными цилиндрами с $\mu_r = const$. Используя найденные в [7] решения, можно получить в цилиндрической системе координат $\{r, \varphi, z\}$ следующие аналитические соотношения для основной гармонической векторного потенциала внешней части тороидальной обмотки.

В области $r_v \leq r \leq r_p$

$$A_z(r, \varphi) = \frac{\mu_0 w_a i_a k_a}{2\pi r} \left(\frac{r}{r_p}\right)^p \frac{[1 + k_{\mu i} \left(\frac{r_p}{r}\right)^{2p}][1 + k_{\mu 0} \left(\frac{r_p}{r_w}\right)^{2p}]}{1 + k_{\mu i} k_{\mu 0} \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p}} \sin p\varphi. (1)$$

В области $r_p \leq r \leq r_w$

$$A_z(r, \varphi) = \frac{\mu_0 w_a i_a k_a}{2\pi r} \left(\frac{r_p}{r}\right)^p \frac{[1 + k_{\mu i} \left(\frac{r_v}{r_p}\right)^{2p}][1 + k_{\mu 0} \left(\frac{r_p}{r_w}\right)^{2p}]}{1 + k_{\mu i} k_{\mu 0} \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p}} \sin p\varphi. (2)$$

В приведенных соотношениях $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; i_a – мгновенное значение тока фазы; w_a – число витков фазы якоря; p – число пар полюсов;

$k_{\mu i(0)} = \frac{\mu_{ri(0)} - 1}{\mu_{ri(0)} + 1}$ – коэффициенты, характеризующие магнитные свойства среды под внешней частью (i) и над ней (0);

$k_a = \frac{\sin \frac{\pi}{2m_\phi}}{q \sin \frac{\pi}{2m_\phi q}}$ – коэффициент распределения обмотки;

m_ϕ – число фаз; q – число условных пазов на полюс и фазу; обозначения радиусов r_p, r_v, r_w соответствуют рис. 5.

Выражения (1–2) определяют магнитные поля внутренней и внешней частей обмотки для всех рассматриваемых случаев. Так, например, когда внешняя часть расположена между двумя стальными цилиндрами (рис. 5а), в (1–2) следует положить $\mu_{ri} \rightarrow \infty$ и $\mu_{r0} \rightarrow \infty$ ($k_{\mu i} = k_{\mu 0} = 1$). Если внешняя часть находится между двумя электропроводящими оболочками (рис. 5г), то $\mu_{ri} \rightarrow 0$ и $\mu_{r0} \rightarrow 0$ ($k_{\mu i} = k_{\mu 0} = -1$). Выражения для векторного потенциала активной части обмотки для зон $r \leq r_a$ и $r_a \leq r \leq r_{si}$ одинаковы во всех случаях и получаются из (1–2), если в них положить $r_p = r_a, r_v = 0, r_w = r_{si}, k_{\mu i} = 1$.

Индуктивность фазы определяется как удвоенная сумма индуктивностей внутренней L_a и внешней L_p частей фазы:

$$L = 2(L_a + L_p). (3)$$

Индуктивности L_a и L_p определяются по известному соотношению

$$L_{a(p)} = \frac{\Psi_{a(p)}}{i_a}.$$

Потокоцепления внутренней Ψ_a и внешней Ψ_p частей обмотки при двухмерном характере распределения магнитного поля имеют вид

$$\Psi_{a(p)} = k_a w_a \oint A dl = k_a w_a A_0 l, (4)$$

где A_0 – амплитудное значение векторного потенциала при $\varphi = \pi/2p$, рассчитанное на радиусе r_a или r_p цилиндрической поверхности, на которой распределен токовый слой; l – аксиальная длина внутренней части обмотки.

Индуктивность внутренней части обмотки якоря во всех конструктивных схемах одинакова и при условии $k_{\mu i} = 1$ имеет вид

$$L_a = L_0 \left[1 + \left(\frac{r_a}{r_{si}}\right)^{2p} \right],$$

где $L_0 = \frac{\mu_0 w_a^2 k_a^2 l}{2\pi r}$.

Индуктивности внешних частей могут быть записаны как

$$L_p = L_0 \frac{\left[1 + \left(\frac{r_v}{r_p}\right)^{2p} \right] \left[1 + \left(\frac{r_p}{r_w}\right)^{2p} \right]}{\left[1 + \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p} \right]} (5)$$

для схемы на рис. 5а;

$$L_p = L_0 \frac{\left[1 - \left(\frac{r_v}{r_p}\right)^{2p} \right] \left[1 + \left(\frac{r_p}{r_w}\right)^{2p} \right]}{\left[1 - \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p} \right]} (6)$$

для схемы на рис. 5б;

$$L_p = L_0 \frac{\left[1 + \left(\frac{r_v}{r_p}\right)^{2p} \right] \left[1 - \left(\frac{r_p}{r_w}\right)^{2p} \right]}{\left[1 + \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p} \right]} (7)$$

для схемы на рис. 5в;

$$L_p = L_0 \frac{\left[1 - \left(\frac{r_v}{r_p}\right)^{2p} \right] \left[1 - \left(\frac{r_p}{r_w}\right)^{2p} \right]}{\left[1 - \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p} \right]} (8)$$

для схемы на рис. 5 г.

Если пренебречь наличием изоляции, то толщина обмотки $\Delta = r_w - r_v$ и величины $r_w, r_v, r_p, r_{si}, r_a$ связаны соотношениями $r_v = r_p - \Delta/2, r_w = r_p + \Delta/2, r_{si} = r_a + \Delta/2$. После их подстановки в (5–8) и разложения по степеням малых относительных параметров $\Delta_p^* = \Delta/r_p < 1, \Delta_a^* = \Delta/r_a < 1$ можно получить с точностью до членов $O(\Delta_{a(p)}^2)$ следующие выражения:

$$L_p \approx 2L_0 / (p\Delta_p^*) \text{ – для схемы на рис. 5а; } (9)$$

$$L_p \approx p\Delta_p^* L_0 / (1 - p\Delta_p^*) \text{ – для схемы на рис. 5 б, в; } (10)$$

$$L_p \approx (p\Delta_p^*)^2 L_0 / 4 \text{ – для схемы на рис. 5г; } (11)$$

$$L_a \approx L_0 (2 - p\Delta_a^*). (12)$$

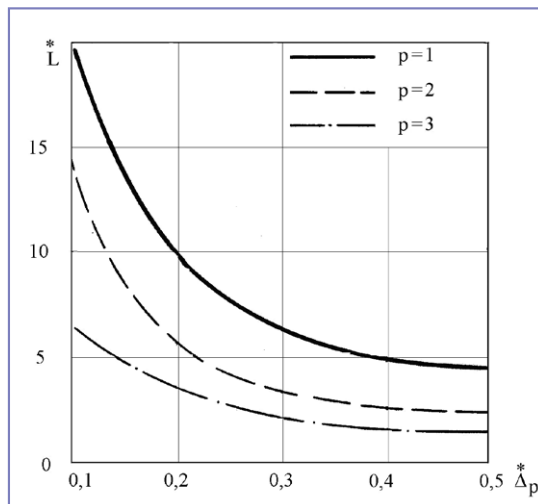


Рис. 6. Зависимость индуктивности пассивной части обмотки от ее относительной толщины при ферромагнитном экранировании и различном числе пар полюсов

Для определения главной индуктивности фазы (с учетом взаимной индуктивности с другими фазами) выражение (3) надо умножить на $m/2$ [8, 9]. На рис. 6 и 7 приведены зависимости относительных индуктивностей $\dot{L}_p \approx L_p/L_0 = \dot{L}_p(\Delta_p, p)$, рассчитанные по (9-11). Как следует из графиков, наименьшей индуктивностью обладает схема на рис. 5г, а наибольшей – схема на рис. 5а.

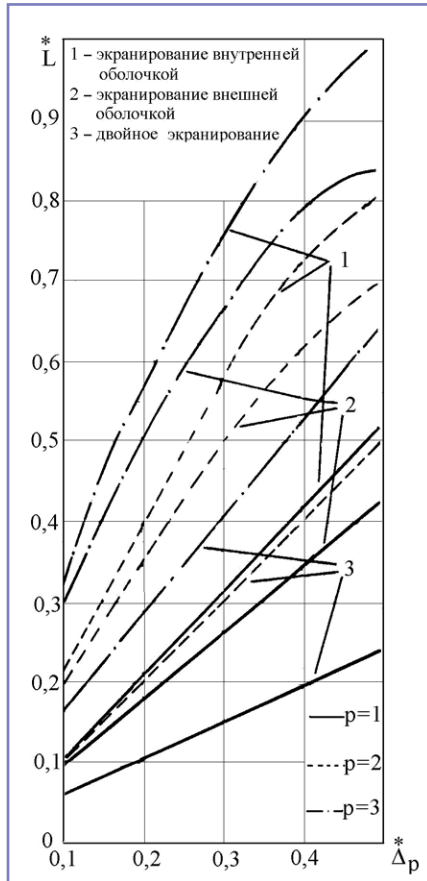


Рис. 7. Зависимость индуктивности пассивной части обмотки от ее относительной толщины при электромагнитном экранировании и различном числе пар полюсов

Оценка потерь в проводящих экранирующих оболочках

Оценки потерь в проводящих экранирующих оболочках (рис. 5 б-г) от токов, наведенных магнитным полем внешней части обмотки, проведены в приближении токовых слоев, распределенных на радиусах r_v и r_w . Тогда в зоне тока каждой оболочки справедливо уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t} [A_p(r_{v(w)}, \varphi, t) + A_{v(w)}(r_{v(w)}, \varphi, t)] = -E, \quad (13)$$

где $E = \frac{J_{v(w)}}{\sigma h_{v(w)}}$ – напряженность электрического поля;

σ – удельная электропроводность материала оболочки; $h_{v(w)}$ – толщина реальной оболочки, замещенной токовым слоем; $A_{v(w)}$ – векторные потенциалы внутренней оболочки (схема б), внешней оболочки (схема в) или их сумма (схема г).

Векторные потенциалы от токов в экранирующих оболочках могут быть представлены как

$$A_w(r, \varphi, t) = \frac{\mu_0 r_w J_{w0}}{2p} \left(\frac{r}{r_w}\right)^p \frac{[1 + k_{\mu i} \left(\frac{r_v}{r}\right)^{2p}][1 + k_{\mu 0} \left(\frac{r}{r_w}\right)^{2p}]}{1 - k_{\mu i} k_{\mu 0} \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p}} \sin(\omega t + p\varphi + \gamma)$$

при $r_v \leq r \leq r_w$;

$$A_v(r, \varphi, t) = \frac{\mu_0 r_v J_{v0}}{2p} \left(\frac{r_v}{r}\right)^p \frac{[1 + k_{\mu i} \left(\frac{r_{so}}{r_v}\right)^{2p}][1 + k_{\mu 0} \left(\frac{r}{r_w}\right)^{2p}]}{1 - k_{\mu i} k_{\mu 0} \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p}} \sin(\omega t + p\varphi + \gamma)$$

при $r_v \leq r \leq r_w$. Здесь $J_{v(w)0}$ – амплитуды линейных плотностей тока в оболочках; γ – угол фазового сдвига.

После подстановки этих уравнений в (13) и преобразований можно найти распределения токов в электропроводящих оболочках.

Величины потерь в оболочках определяются по соотношению

$$P_{v(w)} = \int_V \frac{J_{v(w)}^2}{\sigma h_{v(w)}} dV,$$

где $dV = h_{v(w)} l r_{cp} d\varphi$ – элементарный объем; l – расчетная длина, равная длине внешней части обмотки; r_{cp} – средний радиус оболочки.

После интегрирования и простых преобразований получим

$$P_v = P_{0v} \left(\frac{r_v}{r_p}\right)^{2p} \frac{[1 \pm \left(\frac{r_{so}}{r_w}\right)^{2p}]^2}{[1 \pm \left(\frac{r_v}{r_w}\right)^{2p}]^2}; \quad (14)$$

$$P_w = P_{0w} \left(\frac{r_p}{r_w}\right)^{2p} \frac{[1 \pm \left(\frac{r_{so}}{r_p}\right)^{2p}]^2}{[1 \pm \left(\frac{r_{so}}{r_w}\right)^{2p}]^2}; \quad (15)$$

$$P_{0v(w)} = \frac{l(m\phi_w a i_a k_a)^2}{\pi \sigma h_{v(w)}}$$

Здесь P_w и P_v – потери во внешней и внутренней оболочках. Знак (+) относится к вариантам схем б, в, знак (–) – к схеме г (рис. 5). При определении потерь во внешней оболочке внутренняя предполагалась идеальной диамагнитной $k_{\mu i} = -1$. Потери во внутренней оболочке определялись в предположении

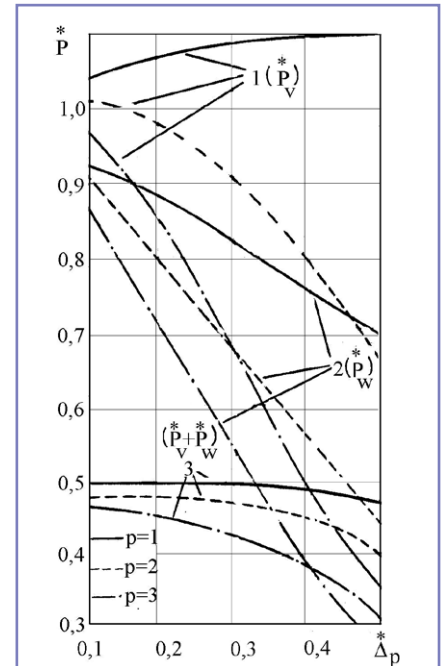


Рис. 8. Зависимости нормированных потерь в экранирующих электропроводящих оболочках при разном числе пар полюсов

идеальной диамагнитной внешней оболочки $k_{\mu 0} = -1$ и идеального ферромагнитного сердечника $k_{\mu i} = +1$.

Выражения (14-15) позволяют определить величины потерь в зависимости от основных параметров экранированных кольцевых обмоток якоря $P_{v(w)} = f(p, \Delta_p)$. Зависимости нормированных потерь

$$P_{v(w)}^* = \frac{P_{v(w)}}{P_{0v(w)}} = f(p, \Delta_p^*)$$

приведены на рис. 8.

Выводы

Увеличение индуктивности тороидальной обмотки из-за удвоенного числа витков по сравнению с традиционной ба-
рабанной обмоткой может быть скомпен-
сировано двухсторонним электромаг-
нитным экранированием внешней части.
Двойное значение витков на активном
сопротивлении не сказывается, так как
обмотка выполнена из ВТСП-ленты, и ее
омическое сопротивление равно нулю.

Изменение величины потерь в экра-
нирующих проводящих оболочках
определяется характером распределе-
ния магнитной индукции в зоне их рас-
положения. Максимальные значения
соответствуют двухполюсной магнитной
системе, что связано с наибольшей ин-
тенсивностью магнитного поля. Суммар-
ные потери в электропроводящих экра-
нах при полном экранировании меньше
соответствующих потерь при односто-
роннем экранировании внешней части
тороидальной обмотки, что объясняется
взаимным размагничивающим действи-
ем проводящих оболочек.

Исследование выполнено за счет
гранта Российского научного фонда
(проект № 17-19-01269).

Литература

1. Чубраева Л.И. Генераторы нетрадиционно-
го исполнения. – Л.: Наука, 1991. – 246 с.
2. Brunet T., Tixador P., Nihart H. Cryogenic con-
ception for full superconducting generators: re-
alization of superconducting armature and cryo-
stat // Cryogenics. – Vol. 28–1988. – P. 751–755.
3. Brunet T., Tixador P., Vedrine P. Experimental
results of an experimental three-phase AC su-
perconducting armature and cryostat // IEEE
Trans. on Mag. – Vol. 25–1989. – P. 1811–1814.
4. Muta I., Tsukuji H., Tsutsui Y et al. Fully su-
perconducting AC generator with brushless exci-
tation system // Int. Conf. on Magnetic Technology
(MT-11). Tsukuba, Japan, 1989. Report ND-05, 6 p.
5. Сверхпроводниковые электрические ма-
шины и магнитные системы / Под ред. Алиев-
ского Б.Л. – М.: МАИ, 1993. – 340 с.
6. Специальные электрические машины
(в 2 кн.) / Под ред. Алиевского Б.Л. – М.: Энер-
гоатомиздат, 1993, книга 2, 368 с.
7. Hughes A., Miller T. Analysis of fields
and inductances in air-cored Synchronous
machines // Proc. Inst. Elec. Eng. – 1977. –
Vol. 124. – № 2. – P. 121–126.
8. Иванов-Смоленский А.В. Электрические
машины. – М.: МЭИ, 2004. – Т1–Т2.
9. Пенкин В.Т. Разработка синхронных элек-
трических машин с композитными и объем-
ными сверхпроводниками в роторе. Доктор-
ская диссертация. – М.: МАИ, 2012. – 310 с.

Зечихин Борис Семенович

Родился в 1931 году. В 1955 году окончил
Московский авиационный институт (МАИ)
по специальности «Электрооборудование
летательных аппаратов». Доктор техниче-
ских наук, профессор. В 1983 году защитил
диссертацию на тему «Расчеты электромаг-
нитных полей в синхронных электрических
машинах». Опыт работы – 62 года. В настоя-
щее время работает профессором кафедры
«Электроэнергетические, электромеханиче-
ские и биотехнические системы» МАИ (НИУ).
Имеет 82 научных труда, в том числе патенты
на изобретения.

Ковалев Константин Львович

Родился в 1971 году. В 1993 году окончил Мо-
сковский инженерно-физический институт по
специальности «Теоретическая физика». Док-
тор технических наук, профессор. В 2005 году
защитил докторскую диссертацию на тему
«Методы расчета электрических машин с мас-
сивными высокотемпературными сверхпро-
водниками». Опыт работы – 26 лет. В настоя-
щее время работает заведующим кафедрой
«Электроэнергетические, электромеханиче-
ские и биотехнические системы» МАИ (НИУ).
Имеет 120 научных трудов, в том числе 20 па-
тентов на изобретения.

Пенкин Владимир Тимофеевич

Родился в 1959 году. В 1983 году окончил
Московский авиационный институт по спе-
циальности «Электрооборудование лета-
тельных аппаратов». Доктор технических
наук, профессор. В 2012 году защитил док-
торскую диссертацию на тему «Разработка
синхронных электрических машин с компо-
зитными и объемными сверхпроводниками
в роторе». Опыт работы – 34 года. В настоя-
щее время работает профессором кафедры
«Электроэнергетические, электромеханиче-
ские и биотехнические системы» МАИ (НИУ).
Имеет 94 научных труда, в том числе 8 патен-
тов на изобретения.

Задачин Алексей Валерьевич

Родился в 1993 году. В 2017 году окончил
Московский авиационный институт по спе-
циальности «Управление в технических си-
стемах». Опыт работы – 2 года. В настоящее
время учится в аспирантуре МАИ (НИУ). Име-
ет 2 научных труда.

Zechikhin Boris

Was born in 1931. In 1955 graduated from
Moscow Aviation Institute (MAI) and got a
degree in «Electrical equipment of flying ma-
chines». Doctor of Engineering Science, pro-
fessor. In 1983 passed Ph.D. defense on the
topic of «The analysis of electromagnetic fields
in synchronous machines». He has 62 years of
working experience. At the present time he is
being a professor in MAI (NRU) at «Electropme-
chanical and bioengineering systems» depart-
ment. He has 82 academic papers, including
invention patents.

Kovalev Konstantin

Was born in 1971. In 1993 graduated from
Moscow Engineering Physics Institute and got
a degree in «Theoretical Physics». Doctor of
Engineering Science, professor. In 2005 passed
Ph.D. defense on the topic of «Computational
methods of electrical machines with massive
high-temperature superconductors». He has
26 years of working experience. At the present
time he is being the head of «Electromechani-
cal and bioengineering systems» department
in MAI (NRU). He has 120 academic papers, in-
cluding 20 invention patents.

Penkin Vladimir

Was born in 1959. In 1983 he graduated from
Moscow Aviation Institute and got a degree
in «Electrical equipment of flying machines».
Doctor of Engineering Science, professor.
In 2012 passed Ph.D. defense on the topic of
«The development of synchronous machines
with composite and massive superconduc-
tors in rotor». He has 34 years of working
experience. At the present time he is being
a professor at «Electromechanical and bioen-
gineering systems» department in MAI (NRU).
He has 94 academic papers, including 8 in-
vention patents.

Zadachin Alexey

Was born in 1993. In 2017 he graduated from
Moscow Aviation Institute and got a degree in
«Management in engineering systems». He has
2 years of working experience. At the present
time he is doing post-graduate studies in MAI
(NRU). He has 2 academic papers.

Преимущества использования повышающих преобразователей постоянного напряжения в составе системы тягового электрооборудования перспективных транспортных средств

// The advantages of using a step-up DC-DC Converter in the system of traction electric equipment of promising vehicles //

Гулямов К.Х.,
Сидоров К.М., к. т. н.,
Ютт В.Е., д. т. н., профессор,
Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), Москва

В статье рассмотрены вопросы, связанные с дополнительным преобразованием электроэнергии в силовой цепи постоянного тока системы тягового электрооборудования электромобилей и гибридных автомобилей. Представлено обоснование целесообразности применения повышающих преобразователей постоянного напряжения в энергетической системе перспективного электрического транспорта, показаны преимущества реализации указанного решения. Рассмотрен вопрос расчетной оценки основных параметров повышающих преобразователей напряжения, интегрированных в состав силовой энергетической системы электрического транспортного средства.

Ключевые слова: электромобиль, преобразователь напряжения, тяговое электрооборудование, аккумуляторная батарея, контроллер, методика, расчет.

Дальнейшее совершенствование конструкции двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и используемых технологий по оптимизации рабочих процессов последних не способно в полной мере решить вопросы энергетической зависимости автотранспорта от нефтепродуктов. Наряду с этим высокие темпы и уровень автомобилизации усугубляют экологические проблемы, связанные с загрязнением атмосферы токсичными выбросами от ДВС. В этой связи электромобили и автомобили с комбинированными энергоустановками как альтернатива традиционным транспортным средствам (ТС) становятся все более привлекательными на фоне обострения указанных проблем.

This article considers the issues connected with extra power conversion in the power circuit DC traction system of an electric equipment of electric and hybrid vehicles. Presents rationale for the use of a step-up DC-DC Converter in an energy system perspective of electric vehicles, the advantages of the implementation of this decision. Consider the issue of estimating the main parameters of the boost converters, is integrated into the power system of electric vehicle.

Keywords: the electric vehicle, a voltage Converter, traction electrical equipment, battery, controller, the method, of calculation.

Несмотря на высокий уровень существующих разработок силового электрооборудования для ТС на электрической тяге, на сегодняшний день имеется ряд проблем, препятствующих массовому использованию электромобилей. К основным недостаткам можно отнести низкие показатели удельной энергии и мощности, а также высокую стоимость используемых в составе батареи аккумуляторов.

Одним из возможных вариантов решения задачи повышения тяговых характеристик и улучшения массогабаритных показателей системы тягового и энергетического оборудования является увеличение напряжения источника

энергии. Однако более высокие значения номинального напряжения тягового источника влекут за собой увеличение количества последовательно включенных аккумуляторов в батарее, усложнение системы контроля состояния и балансировки аккумуляторов, что в итоге приводит к повышению конечной стоимости тягового источника тока. Одним из наиболее эффективных способов устранения указанной проблемы может быть решение, которое не усложняет конструкцию тяговой батареи как таковой. Задача повышения напряжения в системе тягового электрооборудования может быть реализована за счет применения обратимого преобразователя постоянного напряжения (ОППН).

В данной статье рассмотрены вопросы расчетной оценки основных параметров ОППН в составе силовой энергетической системы электрического транспортного средства (ЭС).

Применение обратимого преобразователя постоянного напряжения в высоковольтной цепи электромобиля

Энергетическая система (ЭС) электрического транспортного средства состоит, как правило, из источника электрической энергии (тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ)), трехфазного тягового инвертора (ТТИ) и тягового электродвигателя (ТЭД). При этом в качестве ТЭД преимущественно используются электрические машины переменного тока (асинхронные с короткозамкнутым ротором, синхронные с постоянными магнитами).

На рис. 1 представлен пример структурной схемы энергетической системы современного электромобиля, в которой отражены указанные компоненты.

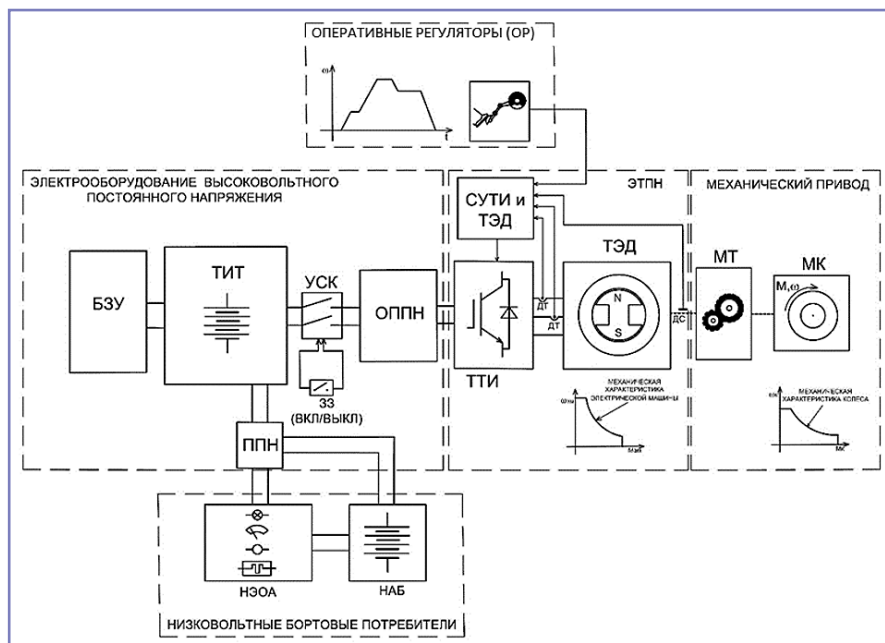


Рис. 1. Структурная схема энергетической системы электромобиля:
БЗУ – бортовое зарядное устройство; ТИТ – тяговый источник тока; УСК – устройство силовой коммутации; ЗЗ – выключатель главной цепи (замок зажигания); ОППН – обратимый преобразователь постоянного напряжения; ППН – понижающий преобразователь постоянного напряжения; НЭОА – низковольтное электрооборудование автомобиля; НАБ – низковольтная бортовая аккумуляторная батарея; ТТИ – трехфазный тяговый инвертор; СУТИ и ТЭД – системы управления тяговым инвертором и тяговым электродвигателем; ОР – оперативные регуляторы тяги и торможения; МТ и МК – механическая трансмиссия и ведущие колеса

Помимо указанных основных компонентов, для полноценного функционирования электромобиля ЭС снабжена дополнительными вспомогательными элементами, такими как бортовое зарядное устройство (БЗУ), устройство силовой коммутации (УСК), оперативные регуляторы (ОР) тяги и торможения, понижающий преобразователь постоянного напряжения (ППН).

В схеме (рис. 1) в качестве тягового электродвигателя рассматривается синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов. Тяговый инвертор обеспечивает преобразование постоянного напряжения ТАБ в трехфазное переменное напряжение с регулируемой частотой и величиной выходного напряжения. Ускорение и замедление электромобиля обеспечиваются регулированием двух параметров: крутящего момента на валу и скорости вращения ротора электрической машины. Эти параметры регулируются инвертором путем изменения величины и частоты питающего тяговым электродвигатель напряжения.

Регулирование напряжения и частоты осуществляется системой управления тяговым инвертором (СУТИ)

посредством широтно-импульсной модуляции. При этом в качестве коммутационных элементов инвертора используются IGBT-транзисторы. На вход СУТИ подаются сигналы задания тяги и торможения. Источниками указанных сигналов являются датчики, установленные на педалях тяги и торможения. Помимо информации по заданию режима работы тягового электропривода, на вход СУТИ направляются сигналы обратной связи (ОС), предоставляющие сведения о токовых нагрузках на электропривод и частоте вращения вала ТЭД. СУТИ на основе всех входных параметров формирует необходимые сигналы управления для переключающих элементов.

Кроме инвертирующего режима, данный преобразователь выполняет функцию выпрямителя, преобразуя трехфазное переменное напряжение в постоянное в режиме рекуперации электроэнергии при торможении ТС. В этом режиме работы обеспечиваются обратное протекание тока и, соответственно, заряд ТАБ [6].

Как известно, из всех элементов, входящих в энергетическую систему современных электромобилей, самым сложным и дорогостоящим компонентом

является ТАБ. Кроме того, тяговая аккумуляторная батарея по сравнению с другими основными блоками системы тягового и энергетического оборудования отличается наибольшей массой (200...600 кг в зависимости от типа и характеристик ЭМ) и имеет значительные габаритные размеры и высокую стоимость. Указанные свойства определяют одну из основных проблем электромобильного транспорта, ограничивающую повсеместное применение ЭМ и успешную конкуренцию с традиционными автомобилями на основе ДВС [4].

Современные электрические и гибридные автомобили, выпускаемые такими ведущими производителями, как Toyota, Nissan, Ford, Mitsubishi, Tesla Motors и другие, в качестве ТАБ используют преимущественно никель-металлогидридные и литийионные аккумуляторы. Последний тип аккумуляторов получил широкое распространение из-за высоких показателей удельной мощности, энергии и срока службы.

Конструкция литийионных ТАБ состоит из множества последовательно и параллельно соединенных цилиндрических или призматических аккумуляторов с рабочим напряжением каждого 3,5–3,7 В. При этом единичный аккумулятор или небольшая группа аккумуляторов оснащается устройством контроля состояния, обеспечивающим непрерывный контроль напряжения, степени заряженности, температуры, а также реализацию режима балансировки аккумуляторов в батарее и защитных функций. Использование в составе тяговых источников тока аккумуляторов указанного типа и исполнения, наряду со значениями номинального напряжения 300...400 В, является оптимальным условием достижения компромисса между массогабаритными характеристиками ТАБ, мощностными и энергетическими показателями. Следует отметить, что увеличение номинального напряжения ТАБ относительно указанных значений могло бы способствовать снижению токовых нагрузок в системе тягового электропривода при сохранении мощности или увеличению мощности всей системы при сохранении значений тока. Однако изготовление ТАБ с номинальным напряжением в диапазоне 600...700 В создает определенные проблемы, связанные с неотъемлемым увеличением последовательно включенных аккумуляторов в батарее,

усложнением системы контроля состояния и балансировки аккумуляторов, увеличением потерь энергии при балансировке. Указанные проблемы неразрывно связаны с увеличением стоимости и надежности ТАБ в целом.

Несмотря на это, потребность в использовании высоковольтных тяговых источников тока сохраняется для задач повышения тягово-энергетических характеристик электропривода. Известно, что за счет увеличения постоянного напряжения на входе трехфазного инвертора и, соответственно, на обмотках статора ТЭД в граничных режимах при условии постоянства мощности, во-первых, повышаются тягово-энергетические характеристики электропривода, во-вторых, снижаются токовые нагрузки на силовые цепи и обмотки электрической машины.

Необходимость снижения токовых нагрузок может появиться при использовании тяговой электрической машины большой мощности (50 кВт и выше). Тенденция к повышению тяговых характеристик наблюдается в современных электромобилях, где по мере развития силовой электроники и появления новых источников энергии производители стараются повысить тяговые характеристики выпускаемых автомобилей на электрической тяге. При больших мощностях в пиковые моменты нагрузки по обмоткам двигателя и силовым цепям, в том числе по ключевым транзисторам инвертора, будут протекать значительные токи. Увеличение токовых нагрузок связано с дополнительными потерями энергии, увеличением сечения проводников, организацией более интенсивного теплоотвода системой охлаждения и, как следствие, ухудшением массогабаритных показателей компонентов системы тягового электрооборудования. В итоге данные обстоятельства будут приводить к снижению эффективности силовой установки и ухудшению эксплуатационных показателей транспортного средства [3].

Одним из возможных вариантов повышения питающего напряжения инвертора и электрической машины при использовании ТАБ с более низким напряжением и без существенного усложнения силовой установки электромотоцикла является применение промежуточного обратимого преобразователя постоянного напряжения (рис. 1). Данный преобразователь включается во входной силовой цепи постоянного тока

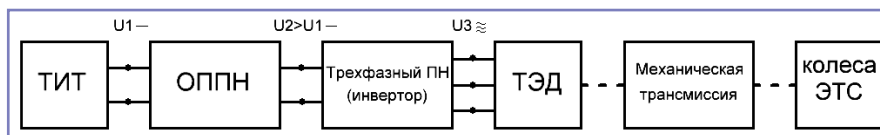


Рис. 2. Функциональная схема ЭС ЭТС с применением ОППН:
— — — — — электрическая связь; - - - - - механическая связь

тягового инвертора и может быть интегрирован в конструкцию последнего. Основная задача такого преобразователя – повышение постоянного напряжения ТАБ в постоянное напряжение на входе инвертора. При использовании ОППН может достигаться двукратное увеличение напряжения.

Применение промежуточного звена повышения постоянного напряжения ТАБ имеет следующие преимущества:

- снижение токовых нагрузок в обмотках двигателя и ключевых элементах инвертора;
- повышение тяговых характеристик электропривода и увеличение частоты вращения при поддержании максимального момента ТЭД;
- повышение массогабаритных показателей силовой установки;
- снижение потерь энергии и повышение эффективности энергетической системы;
- увеличение максимальной частоты вращения ротора ТЭД, а в случае использования синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов – возможность компенсации более высоких значений противо-ЭДС;
- использование ТАБ с относительно низкими значениями номинального напряжения.

Недостатком данного способа оптимизации энергетической системы электромотоцикла является внедрение в конструкцию дополнительного преобразователя, усложняющего структуру и увеличивающего стоимость силовой установки. Однако положительный эффект от реализации подобной системы нивелирует указанные недостатки, и можно говорить о целесообразности и эффективности данного решения в сравнении с изменением конструкции тяговой аккумуляторной батареи.

Определение входных и выходных параметров обратимого преобразователя постоянного напряжения

При известных параметрах электропривода электромотоцикла установленная мощность ОППН определяется исходя

из мощности силового электропривода с учетом потерь энергии [1]:

$$P_{\text{оппн}} = \frac{P_{\text{тти}}}{\eta_{\text{тти}}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{тти}} = \frac{P_{\text{тэд}}}{\eta_{\text{тэд}}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{тэд}} = M_{\text{тэд}} \cdot \omega_{\text{тэд}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{тти}}$ – выходная мощность трехфазного тягового инвертора; $\eta_{\text{тти}}$ – КПД трехфазного тягового инвертора, о.е.; $P_{\text{тэд}}$ – мощность на валу электродвигателя, кВт; $\eta_{\text{тэд}}$ – КПД тягового электродвигателя, о.е.

Структурная схема, поясняющая этапы преобразования энергии в ЭС ЭТС с применением ОППН, представлена на рис. 2.

С учетом всех факторов выбор выходного напряжения ОППН производится исходя из максимально возможных характеристик ТЭД и ТТИ, с учетом обеспечения надежной изоляции высоковольтных цепей для обеспечения безопасной эксплуатации электромотоцикла [2].

Для расчета основных параметров ОППН можно применять следующие формулы.

Номинальный входной ток ОППН

$$I_{\text{вх.н}} = \frac{P_{\text{вх.н}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{вх.н}}$ – входная мощность ОППН при номинальной нагрузке; $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение ОППН, равное напряжению тяговой аккумуляторной батареи $U_{\text{аб}}$.

Максимальный входной ток ОППН

$$I_{\text{вх.макс}} = \frac{P_{\text{вх.макс}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{вх.макс}}$ – входная мощность ОППН при максимальной нагрузке.

Максимальная пульсация входного тока ОППН (5% от $I_{\text{вх.макс}}$) [5]

$$\Delta I_{\text{вх.макс}} = 0,05 \cdot I_{\text{вх.макс}}. \quad (6)$$

Минимальное входное напряжение

$$U_{\text{мин}} = 0,3 \cdot U_{\text{аб}}. \quad (7)$$

При этом коэффициент 0,3 обусловлен рекомендуемым значением максимальной степени разряженности АБ (70%). Максимальное входное напряжение $U_{\text{макс}} = U_{\text{аб}}$.

Максимальная величина пульсации выходного напряжения (1% от $U_{\text{ВЫХ.МАХ}}$) [5]

$$\Delta U_{\text{ВЫХ.МАХ}} = 0,01 \cdot U_{\text{ВЫХ.МАХ}} \quad (8)$$

где $U_{\text{ВЫХ.МАХ}}$ – максимальное значение выходного напряжения ОППН.

Представленные выше выражения составляют основу методики расчета основных компонентов ОППН в составе ЭТС и предназначены для предварительной оценки параметров обратимого преобразователя постоянного напряжения.

Следует отметить, что определение входных и выходных характеристик ОППН дает идеализированную оценку показателям работы ОППН в составе СТЭО ЭТС. Детализированные расчетные исследования целесообразно проводить с использованием средств математического моделирования.

Выводы

Улучшение эксплуатационных характеристик транспортных средств с электрическим приводом при одновременном совершенствовании тягово-динамических и массогабаритных показателей применяемого электрооборудования является актуальной проблемой, требующей всестороннего рассмотрения. Один из рациональных способов решения данной задачи связан с применением ОППН и повышением постоянного напряжения тягового источника электроэнергии на борту транспортного средства. Применение обратимого преобразователя в составе энергетической системы электромобилей и гибридных автомобилей приводит к дополнительным сложностям и затратам, однако положительные эффекты от реализации звена промежуточного преобразования напряжения нивелируют имеющиеся недостатки и способствуют улучшению важных для транспортного назначения массогабаритных показателей системы тягового электрооборудования.

Литература

1. Ефремов И.С. Теория и расчет тягового привода электромобилей / И.С. Ефремов, А.П. Пролыгин, Ю.М. Андреев, А.Б. Миндлин. – М.: Высшая школа, 1984. – 383 с.

2. Ютт В.Е. Повышение мощности импульсных преобразователей постоянного напряжения с использованием многофазных структур / В.Е. Ютт, К.М. Сидоров, К.Х. Гулямов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 4. – С. 13–16.

3. Ютт В.Е. Применение преобразователей постоянного напряжения в составе энергетической установки электрического транспортного средства / В.Е. Ютт, В.В. Лохнин, К.М. Сидоров, К.Х. Гулямов // Вестник МАДИ. – 2015. – № 4. – С. 34–40.

4. Rodrigo G. Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks / Rodrigo Garcia-Valle. João A. Peças Lopes. – Springer Science + Business Media New York. – 2013. – 325 p.

5. Seref S. Electric Vehicles – Modelling and Simulations / Edited by Seref Soylu. InTech, 2011.

6. Seref S. Electric Urban Transport and Hybrid Vehicles / Edited by Seref Soylu. Croatia: InTech, 2010.

Гулямов Камол Хикматович

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Опыт работы – 2 года. В настоящее время учится в аспирантуре Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). Имеет 5 научных работ.

Сидоров Кирилл Михайлович

Родился в 1983 году. В 2007 году окончил Московский автомобильно-дорожный институт МАДИ (ГТУ) по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». Кандидат технических наук, в 2010 году защитил диссертацию по теме «Энергетическая и топливная эффективность автомобилей с гибридной силовой установкой». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает доцентом на кафедре «Электротехника и электрооборудование» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). Имеет 22 научные работы, 1 патент.

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 государственного технического университета (МАДИ). Имеет более 200 научных трудов, патентов. Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный работник высшей школы, награжден двумя медалями.

Gulyamov Kamol

He was born in 1989. In 2012 he graduated from Tadjik Technical University majoring in «Electric drive and automation of industrial machines and technological complexes». He has 2 years of work experience. At present, he studies in graduate school of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. He has 5 scientific works.

Sidorov Kirill

Was born in 1983. In 2007 graduated from Moscow Automobile-Road Institute MADI (GTU) specialization is «Automobile and tractor electric equipment». Candidate of engineering, in 2010 he defended a thesis, the theme is «Power and fuel efficiency of automobiles with hybrid power unit». He has 10-year experience. At present he is working as docent of «Electro technology and electric equipment» department in Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). He has 22 scientific works, 1 patent.

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 Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). 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.

Повышение энергоэффективности системы реостатного торможения тепловозов

// Increasing energy efficiency of diesel locomotive's resistance braking system //

**Иващенко В.О., к. т. н., доцент,
Изварин М.Ю., к. т. н., доцент,
Ролле И.А., к. т. н.,
ФГБОУ ВО ПГУПС, Санкт-Петербург**

**Леонов А.Е.,
ООО «БалтТрансСервис», Санкт-Петербург**

Проанализированы достоинства и недостатки существующих систем реостатного торможения тепловозов и электроподвижного состава. Предложено схемотехническое решение системы реостатного тормоза тепловоза 2ТЭ116У, позволяющее применять реостатное торможение без дополнительного расхода топлива.

Ключевые слова: удельный расход дизельного топлива, тепловоз, дизель-генератор, тяговый электродвигатель, импульсный преобразователь, аккумуляторная батарея, биполярный транзистор с изолированным затвором, реостатный тормоз.

Достоинства и недостатки существующей системы реостатного торможения отечественных тепловозов

В настоящее время на большом количестве серий тепловозов с электропередачей (некоторые модификации тепловозов 2ТЭ116, 2ТЭ116У, ЧМЭЗТ, ТЭМ18ДМ(В), ТЭП 70БС и других) предусмотрено электрическое реостатное торможение. Несомненные преимущества данного вида тормозов – высокая мощность на больших скоростях, плавное и быстрое регулирование тормозной силы, снижение износа тормозных колодок и колесных пар, равномерный износ тяговой передачи. Однако системе свойственен ряд недостатков, препятствующих ее полноценному использованию. В то же время на электровозах и электропоездах железных дорог и метрополитена система электрического торможения широко используется. Это происходит из-за того, что на электрическом подвижном составе (ЭПС) применение

The advantages and disadvantages of existing resistance braking systems of diesel locomotives and electric rolling stock are analyzed. The circuit solution of the resistance braking system of the 2TE116U diesel locomotive is proposed, which allows resistance braking without additional fuel consumption.

Keywords: specific fuel consumption, diesel locomotive, diesel-electric engine, traction motor, chopper, battery, insulated gate bipolar transistor, dynamic brake.

системы электрического торможения снижает энергопотребление и эксплуатационные затраты, а на тепловозах – увеличивает. Причины указанного явления обусловлены особенностями конструкции тепловозов и принципом действия автономного подвижного состава. Также на электрическом подвижном составе всегда имеется связь с источником электроснабжения, поэтому возможно и рекуперативное торможение. На тепловозах связи с контактной сетью нет, и единственный способ утилизации выработанной энергии – ее преобразование в тепло на тормозных резисторах. Теоретически данную энергию возможно накопить в современных электрических устройствах – ионисторах (суперконденсаторах) и аккумуляторах, однако в мировой практике такие схемы используются в единичных случаях, прежде всего по причине большой массы и габаритов самих накопителей. Второй причиной являются низкое качество и небольшое количество самой

энергии, вырабатываемой двигателями (ТЭД) за время торможения. При торможении напряжение на ТЭД изменяется, отдается относительно большая мощность, но кратковременно (за исключением движения по затяжным спускам). В таком режиме энергию трудно использовать и на ЭПС постоянного тока, не говоря уже про тепловозы. Однако внедрение современных преобразовательных устройств с микропроцессорным управлением позволяет частично решить проблему электрического торможения на тепловозах. Тем не менее гибридные локомотивы с накопителями на основе конденсаторов и аккумуляторов в настоящий момент являются скорее опытными, чем серийными. Но от использования вырабатываемой в режиме торможения энергии конструкторы полностью не отказываются. Так, компания по производству подвижного состава Brookville Equipment Corporation (США), выпускающая как тепловозы, так и ЭПС, производит на своем заводе локомотивы серии CoGeneration™. Тепловозы мощностью 1300–2000 л.с. имеют систему так называемого полурекуперативного торможения – выработанная при торможении энергия распределяется между бортовыми потребителями (вентилятором холодильника, кондиционером кабины, компрессорами и т. д.), избытки гасятся на тормозных сопротивлениях. Сами тепловозы строятся по схеме GenSet с независимыми дизель-генераторными установками, которые в режиме торможения глушатся. Из-за этого потребление топлива при электрическом торможении отсутствует [1, 2].

Имеются также примеры установки третьего рельса на участках с затяжными спусками, для принятия энергии рекуперации от тепловозов. В США иногда используется система электроснабжения с третьим (контактным) рельсом для питания тепловозов электроэнергией (например, в тоннелях), при этом на



Рис. 1. Тепловоз серии CoGeneration™ компании Brookville Equipment Corporation с нулевым потреблением топлива в режиме реостатного торможения

тележках устанавливаются соответствующие токоприемники.

Нормальной практикой для тепловозов является использование реостатного торможения. Основной задачей при этом становится недопущение дополнительного расхода дизельного топлива в этом режиме. Каковы причины появления этого дополнительного расхода? Тяговые двигатели постоянного тока работают в тормозном режиме наиболее эффективно в случае, когда обеспечивается их независимое возбуждение. На отечественных тепловозах проблема решается следующим

образом: обмотки возбуждения включаются последовательно и подключаются к главному генератору через стабилизирующий резистор (рис. 2). В этом случае реостатное торможение эффективно работает до низкой скорости, однако возникает дополнительный расход топлива из-за питания обмоток возбуждения от дизель-генераторной установки.

В целях упрощения ряд узлов на схеме не показан. Схема работает следующим образом: с помощью тормозных переключателей (на схеме не показаны) все шесть обмоток возбуждения ТЭД соединяются последовательно

и подключаются через резистор R_c к выходу выпрямителя B , питаемого шестифазным тяговым генератором G . Регулирование тока возбуждения при торможении осуществляется изменением напряжения на выходе генератора. Каждый из якорей $Я_1$ – $Я_6$ подключается к тормозному резистору R_T индивидуально, что повышает противоюзные свойства. От ступеней тормозных резисторов питаются мотор-вентиляторы, обеспечивающие их же охлаждение. Кроме того, непосредственно от обмоток генератора, минуя выпрямитель, питаются вентиляторы охлаждения ТЭД и холодильника.

Данная схема обеспечивает устойчивую работу в режиме реостатного торможения до низкой скорости, однако необходимость обеспечения требуемой интенсивности охлаждения ТЭД и наличие в схеме резистора R_c вынуждают увеличивать частоту вращения коленчатого вала дизеля до величины 0,815 от номинальной (соответствует 11-й позиции контроллера машиниста), что также вызывает дополнительный расход топлива. В то же время вырабатываемая ТЭД энергия никак не используется и, превращаясь в тепло, рассеивается в атмосфере.

В схемах ЭПС имеются технические решения, позволяющие применять выработанную при торможении энергию для питания возбудителя.

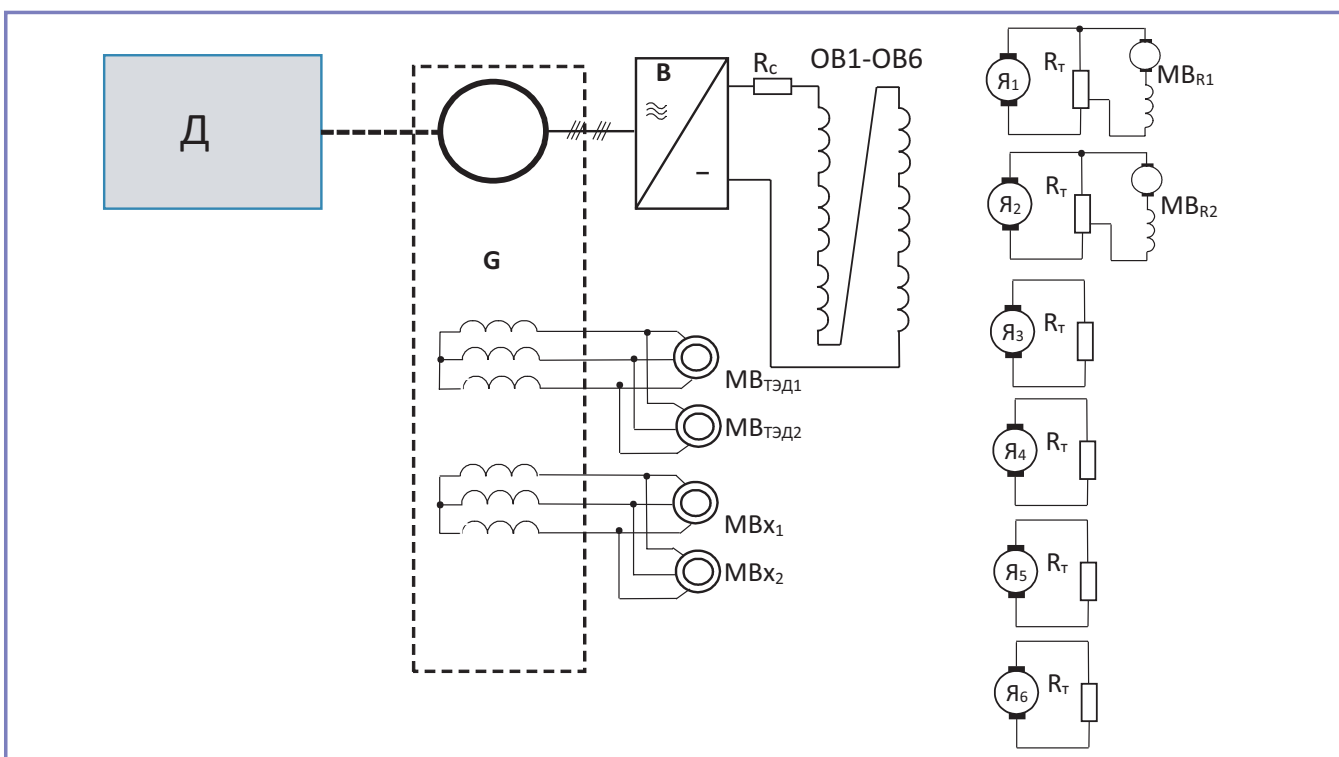


Рис. 2. Существующая принципиальная схема реостатного торможения шестисекционной тепловоза 2ТЭ116 (с электрической схемой № 9)

Современные схмотехнические решения питания преобразователя возбуждения ТЭД в режиме реостатного торможения на ЭПС

Исторически на электроподвижном составе российских железных дорог сложились две системы реостатного тормоза: реостатный тормоз с самовозбуждением тяговых электродвигателей и реостатный тормоз с независимым возбуждением. Достоинствами первой системы являются минимум дополнительного оборудования и отсутствие дополнительного потребления электроэнергии в процессе торможения, недостаток – необходимость принятия мер по выравниванию нагрузок тяговых электродвигателей, за исключением случая, когда все якоря и обмотки возбуждения соединены последовательно, и переход в режим реостатного торможения происходит при уже возбужденных двигателях (электропоезда постоянного тока ЭР2Т, ЭТ всех индексов, ЭД всех индексов). Поскольку регулирование тока возбуждения затруднительно, поддержание тормозной силы происходит за счет регулирования величины сопротивления тормозного резистора.

Система реостатного торможения с независимым возбуждением более широко распространена на электроподвижном составе российских железных дорог. В качестве источника питания обмоток возбуждения (возбудителя) используются:

- секция вторичной обмотки тягового трансформатора в совокупности с управляемым выпрямителем (ВЛ80Т, ВЛ80С);
- аккумуляторная батарея (затем – ступень тормозного резистора) в совокупности с импульсным регулятором (ЧС6, ЧС7, ЧС200);
- статический преобразователь, включающий высоковольтный инвертор, понижающий трансформатор, управляемый выпрямитель (2ЭС4К, 2ЭС6, ЭП2К). Если для двух первых такое включение необходимо для обеспечения рекуперации, то в схеме электровоза ЭП2К явно просматривается сходство с тепловозными системами.

Недостатком системы реостатного торможения с независимым возбуждением является дополнительное потребление электроэнергии в режиме торможения для возбуждения тяговых электродвигателей, причем минимальное

потребление электроэнергии будет при использовании в качестве возбудителя аккумуляторной батареи и ступени тормозного резистора. Частичное решение этой проблемы найдено в регуляторах тока возбуждения скоростных электровозов ЧС200, ЧС6, ЧС7.

Для исключения проблем с выравниванием нагрузок тяговых электродвигателей якоря включаются на индивидуальные тормозные резисторы, а обмотки возбуждения всех электродвигателей соединяются последовательно, так же, как и на тепловозе (рис. 3). Кроме этого, двигатели вентиляторов охлаждения тормозных резисторов также питаются от ступени тормозного резистора, что позволяет автоматически регулировать частоту их вращения в зависимости от тормозного тока. Недостатком питания обмоток возбуждения от ступени тормозного резистора является невозможность регулирования величины этой ступени при исчерпании возможностей регулирования тока возбуждения. Следствием этого является сравнительно высокая скорость окончания реостатного торможения, так как падения напряжения на ступени тормозного резистора не хватает для возбуждения тяговых

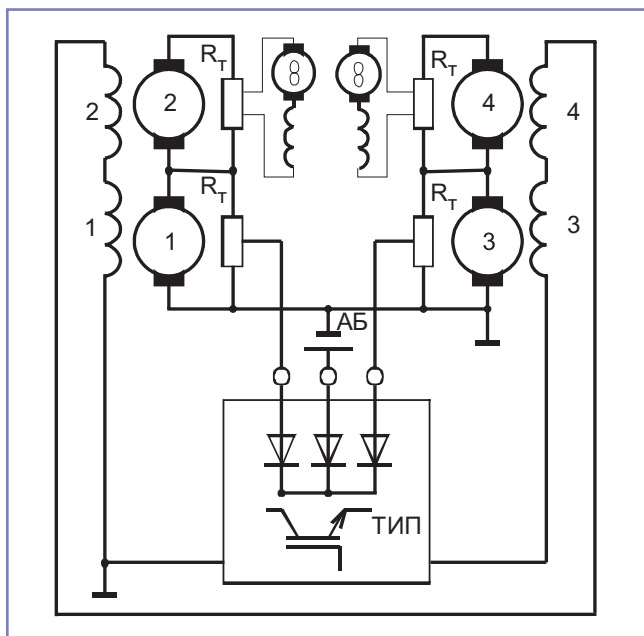


Рис. 3. Принципиальная схема реостатного торможения электровозов типа ЧС6 с независимым возбуждением и питанием преобразователя от ступени тормозного резистора

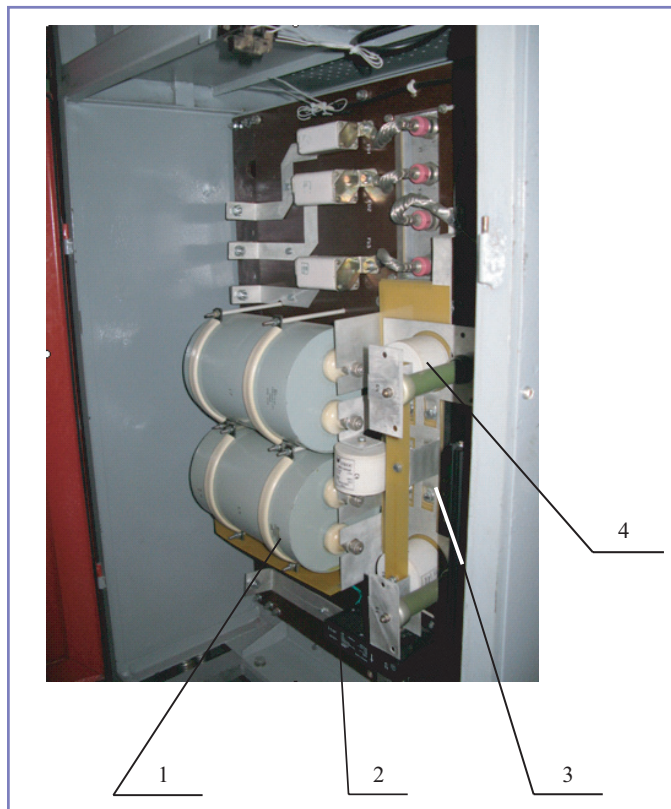


Рис. 4. Транзисторно-импульсный преобразователь: 1 – фильтровые конденсаторы; 2 – датчик тока возбуждения; 3 – транзисторно-диодный модуль МДТКИ-1200-17; 4 – снаббер (защитная цепь)

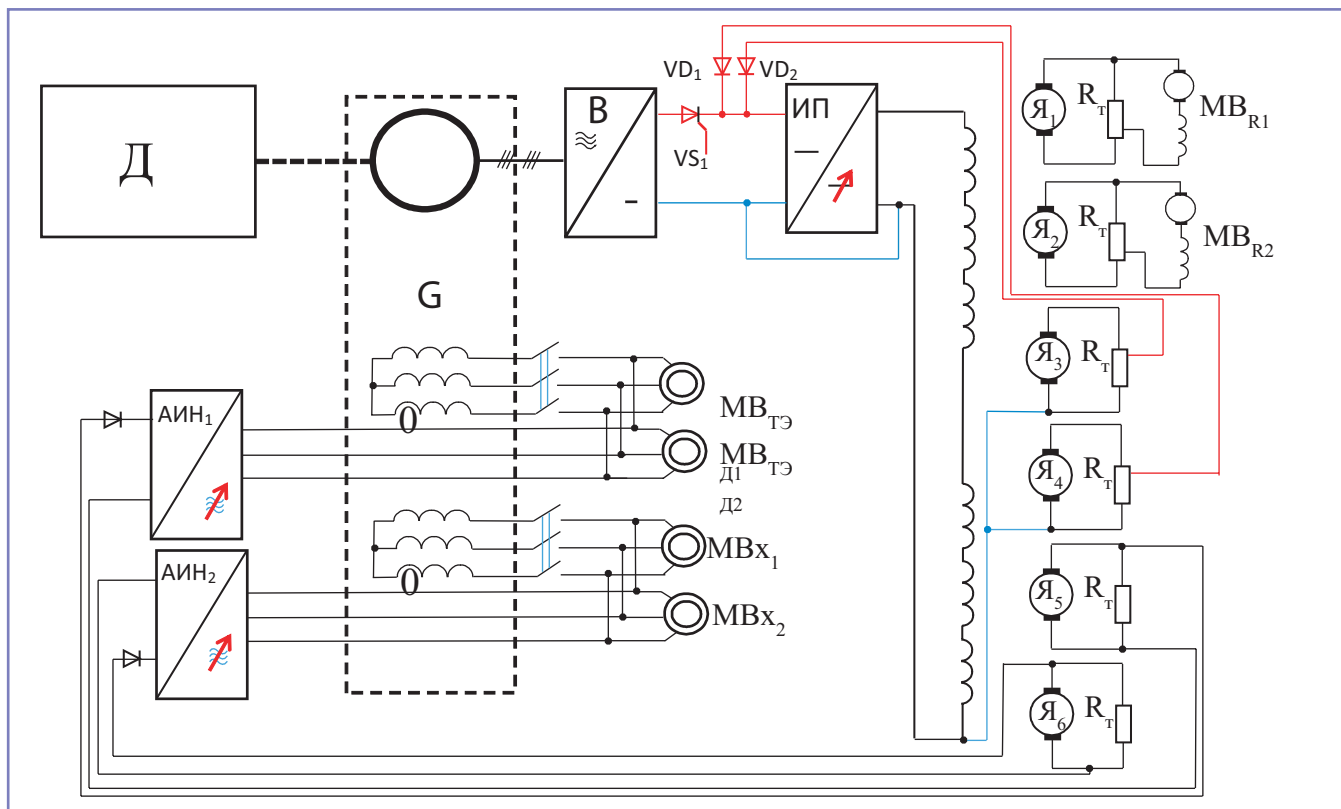


Рис. 5. Принципиальная схема усовершенствованного реостатного тормоза тепловоза 2ТЭ116 (с электрической схемой № 9)

электродвигателей, а перевод питания на аккумуляторную батарею приведет к ее быстрому разряду.

В качестве полупроводниковых приборов регулятора тока возбуждения используются силовые IGBT-транзисторы, имеющие малые массу и габариты и не требующие узлов для коммутации [3].

Такой преобразователь занимает немного места, обеспечивает плавное изменение тока возбуждения от 50 до 750 А во всем диапазоне скоростей при торможении (рис. 4).

Схема реостатного торможения тепловоза без дополнительного потребления топлива

Для более эффективного торможения, снижения расхода тормозных колодок и дизельного топлива в ПГУПС разработана новая схема реостатного торможения тепловозов, сочетающая в себе достоинства рассмотренной выше электровозной системы (отсутствие дополнительного расхода энергии, частичное использование энергии, выработанной ТЭД) и тепловозной (торможение до низкой скорости).

Принципиальная схема новой системы представлена на рис. 5.

Схема работает следующим образом. Вместо балластного резистора в схему

включается импульсный преобразователь. Начальное питание производится открытием тиристора VS1 перед входом в торможение. При этом достаточно напряжения порядка 50–60 В, после чего ток возбуждения плавно регулируется за счет изменения скважности преобразователя. После возбуждения двигателей напряжение на их якорях составляет 300–400 В, что достаточно для закрытия тиристора VS1, при этом повышения оборотов дизеля не требуется. Питание асинхронных двигателей мотор-вентиляторов МВтэ ТЭД и МВх холодильника осуществляется от АИН, подключенного к якорям 5 и 6.

При снижении скорости до 10–15 км/ч питание ИП от ступеней тормозных резисторов становится невозможным, что может потребовать некоторого увеличения оборотов дизеля. На низкой скорости IGBT-транзистор преобразователя полностью открыт, дотормаживание осуществляется по классической схеме. Подобная схема позволит полезно использовать энергию ТЭД, для более подробных исследований необходимо создание опытного образца. Предполагается, что данная система без увеличения расхода топлива на тягу позволит также снизить расход тормозных колодок до 60%.

Литература

1. Официальный сайт компании Brookville: <http://www.brookvillecorp.com>.
2. Тепловозы CoGeneration™ // Журнал Railway Age. 2008. – № 1. – С. 32.
3. Усовершенствованный реостатный тормоз скоростных электровозов постоянного тока. – М.: Локомотив, 2010. – № 8. – С. 26–27.

Ивашенко Валерий Олегович

Родился в 1965 году. В 1988 году окончил ЛИИЖТ по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 2000 году защитил диссертацию по теме «Алгоритмизация определения энергосберегающих режимов ведения пригородных электропоездов постоянного тока». Опыт работы – 29 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО ПГУПС.

Изварин Михаил Юльевич

Родился в 1964 году. В 1987 году окончил ЛИИЖТ по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 1998 году защитил диссертацию по теме «Преобразователь для питания бортовых цепей электропоездов постоянного тока». Опыт работы – 29 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО ПГУПС. Имеет 45 научных трудов.

Ролле Игорь Александрович

Родился в 1978 году. В 2002 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Локомотивы». Кандидат технических наук. В 2006 году защитил диссертацию по теме «Повышение ресурса крышек цилиндров тепловозных дизелей». Опыт работы – 17 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО ПГУПС. Имеет 20 научных трудов.

Леонов Александр Ерофеевич

Родился в 1966 году. В 1993 году окончил Белорусский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Тепловозы и тепловозное хозяйство». Опыт работы – 31 год. В настоящее время работает в ООО «БалтТрансСервис».

Ivaschenko Valery

Was born 1965. In 1988 he graduated from Leningrad State Transport University major-

ing in «Electrification of railway transport». He is Candidate of Technical Sciences, associated professor. In 2000 he defended the dissertation with topic «Algorithmization of the definition of energy-saving modes of maintenance of suburban electric trains of direct current». He has 29 years of work experience. At present he works as associated professor of «Electric traction» department of St. Petersburg State Transport University.

Izvarin Mikhail

Was born in 1964. In 1987 he graduated from Leningrad State Transport University majoring in «Electrification of railway». He is Candidate of Technical Sciences, associated professor. In 1998 he defended the dissertation with topic «Conversion device for power supply of on-board circuits of electric trains of direct current». He has 29 years of work experience. At present he works as associate professor «Electric traction» department of St. Petersburg

State Transport University. He has 45 scientific papers.

Rolle Igor

Was born in 1978. In 2002 he graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in «Locomotives». He is Candidate of Technical Sciences. In 2006 he defended the dissertation with topic «Increase the service life of cylinder head covers of diesel locomotive engines». He has 17 years of work experience. At present he works as associate professor of «Electric traction» department of St. Petersburg State Transport University. He has 20 scientific papers.

Leonov Alexander

Was born in 1966. In 1993 he graduated from Belarusian Institute of Railway engineering majoring in «Locomotives and locomotive electrical equipment». He has 31 years of work experience. At present he works in Balttranservice Limited.

Анализ ошибок моделирования асинхронного двигателя

// Analysis of simulation errors in an asynchronous motor //

**Доманов В.И., к. т. н., доцент,
Доманов А.В., к. т. н., доцент,
Альтахер Аббас А. Карим,
ФГБОУ ВО «УлГТУ», г. Ульяновск**

*Рассматриваются вопросы моделирования асинхронного двигателя. Представлена схема модели двигателя во вращающейся системе координат. Выполнен анализ вариаций параметров модели. Определены величины ошибок, возникающих при изменении сопротивлений статора, ротора и момента инерции при управляющем и возмущающем воздействиях. Сформулированы рекомендации к требованиям по точности и допустимым вариациям основных параметров асинхронного двигателя. **Ключевые слова:** модель, параметры двигателя, переходный процесс, ошибка, вариации параметров, момент инерции, скорость.*

*Asynchronous motor simulation is under consideration. Given motor model in the rotating coordinate system. The analysis of the variations of the model parameters. Defined values of errors that occur when changed the resistance of the stator, the rotor and the moment of inertia at the control and disturbance. Recommendations to the requirements in terms of accuracy and permissible variations of the main parameters of the asynchronous motor. **Keywords:** model, motor parameters, transient, error, variation of parameters, moment of inertia, speed.*

В настоящее время широкое распространение получили электроприводы, построенные по схеме «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (АД). Развитие таких электроприводов привело к созданию бездатчиковых систем

векторного управления АД [1, 2] и применению наблюдателя скорости (НС), который, используя доступные сигналы (ток и напряжение статора), вычисляет текущее значение координаты. Отмечается, что существует большое разнообразие

схем НС [1, 3]. В то же время статическая и динамическая точность работы НС зависит как от выбранной схемы, так и от соответствия ее параметров реальным значениям. В работе оцениваются ошибки, возникающие при вариации параметров модели АД в процессе работы.

Считаем, что параметры двигателя (коэффициенты, сопротивления, индуктивности) и нагрузки (коэффициент передачи, момент инерции) известны. В этом случае по классическим формулам описания АД с короткозамкнутым ротором [1] можно составить структурную схему машины. Для вращающейся системы координат α - β она принимает вид, представленный на рис. 1.

Для случая ориентации вещественной оси по вектору потокоцепления ротора во вращающейся системе координат получено выражение

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_{0ЭЛ} \bar{\Psi}_1 \\ 0 &= R_2 \bar{I}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j\omega_P \bar{\Psi}_2 \\ \bar{\Psi}_1 &= L_1 \bar{I}_1 + L_M \bar{I}_2 \\ \bar{\Psi}_2 &= L_M \bar{I}_1 + L_2 \bar{I}_2 \end{aligned} \right\} (1)$$

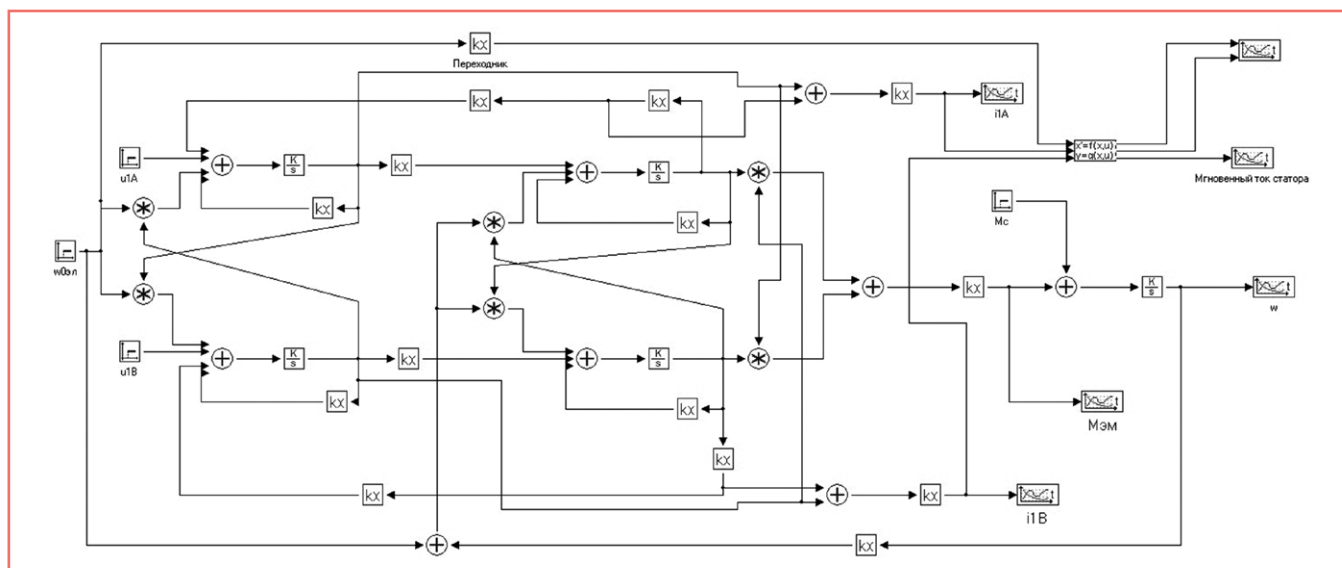


Рис. 1. Модель АД в проекциях пространственных векторов

где U, I, Ψ, R, L – напряжение, ток, потокосцепление, сопротивление и индуктивность;

$\omega_{0ЭЛ}$ – частота вращения векторов относительно неподвижной системы координат;

ω_p – частота вращения пространственных векторов ротора относительно ротора.

Частота вращения ротора относительно неподвижных координат определяется по формуле $\omega = \omega_{0ЭЛ} - \omega_p$.

Предположим, что по каким-либо причинам (нагрев, нелинейность характеристики) изменились реальные значения параметров двигателя. В этом случае исходная модель (рис. 1) будет работать с определенной погрешностью, и координаты, полученные на модели, будут отличаться от первоначального варианта. Для оценки таких погрешностей создана модель, которая содержит два блока:

- M1 – модель, соответствующая рис. 1, с исходными параметрами;
- M2 – модель, соответствующая рис. 1, с измененными параметрами.

Погрешность скорости определяется по выражению

$$\Delta\omega = \omega_{ИСХ} - \omega_{ИЗМ}$$

На рис. 2 показан переходный процесс, соответствующий работе модели на рис. 1.

Рассмотрим ошибки, возникающие при изменении параметров АД.

1. Изменение сопротивления статора. В соответствии с выражениями (1) и моделью (рис. 1) значения соответствующих блоков модели M2 были изменены на 10%. Результат моделирования представлен на рис. 3.

Видно, что при пуске двигателя имеется динамическая ошибка, амплитуда которой составляет ~ 4,5% от значения установившейся скорости. Изменение момента нагрузки при $t = 1$ с практически не вносит погрешности в процесс.

2. Изменение сопротивления ротора. Аналогично проведено моделирование для этого условия (рис. 4).

В этом случае при пуске двигателя также имеется динамическая ошибка

~ 5,5%. Кроме того, появляется статическая ошибка при изменении момента нагрузки ~ 15% от снижения скорости (рис. 3).

3. Изменение момента инерции. Результаты моделирования этого эксперимента представлены на рис. 5.

Как и в предыдущих случаях, имеются динамическая ошибка при пуске (~ 12%) и незначительная динамическая ошибка при изменении момента нагрузки.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- изменения значений сопротивления статора, ротора и момента инерции приводят к появлению динамической ошибки от задающего воздействия. Изменению сопротивления статора соответствует минимальная амплитуда ошибки, а изменению момента инерции – максимальная;
- возмущающее воздействие приводит к появлению статической ошибки при изменении сопротивления ротора, а изменение сопротивления статора

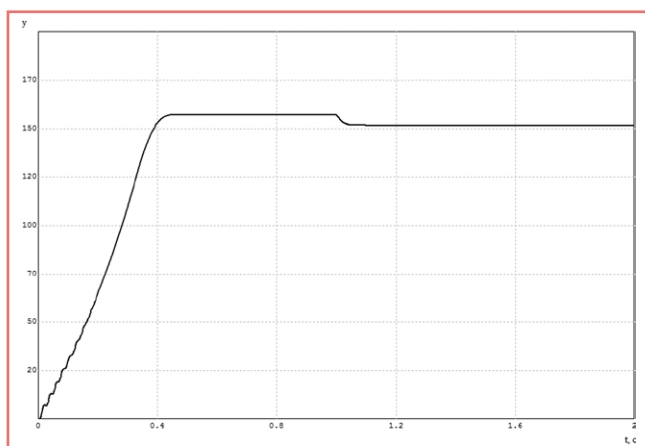


Рис. 2. Переходный процесс пуска АД и сброса нагрузки в момент времени 1 с

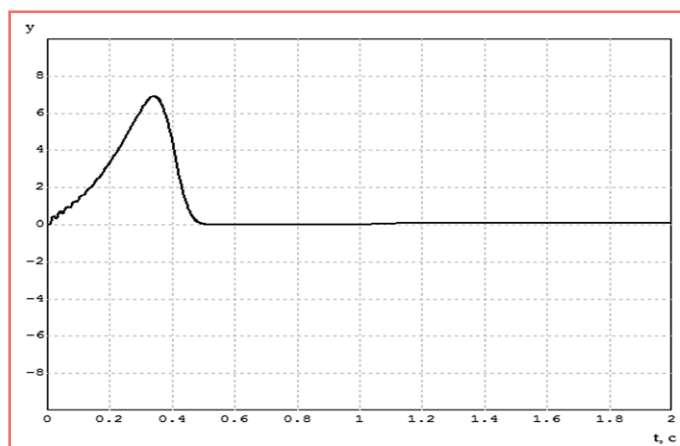


Рис. 3. Изменение ошибки скорости при вариации сопротивления статора

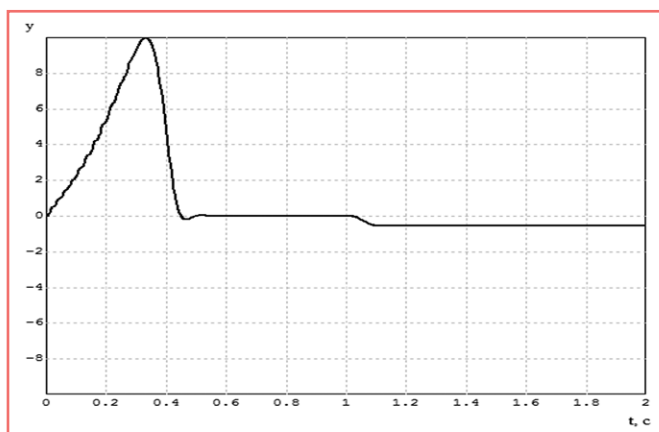


Рис. 4. Изменение ошибки скорости при вариации сопротивления ротора

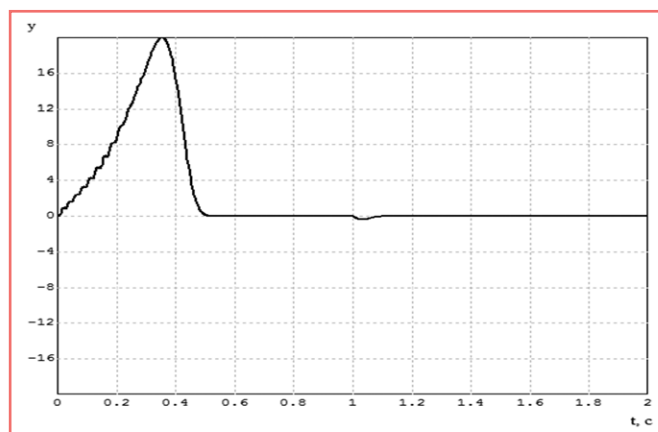


Рис. 5. Изменение ошибки скорости при вариации момента инерции

и момента инерции практически не влияет на процесс;

- для достижения высоких точностных показателей модели при задающем воздействии необходимо с высокой точностью определять значение момента инерции и его текущее изменение;

- для достижения высоких точностных показателей модели при возмущающем воздействии необходимо с высокой точностью определять значение сопротивления ротора и его текущее изменение.

Литература

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Электроприводы. Т. IV – 2 / Л.Б. Масандилов, Ю.Н. Сергиевский, С.К. Козырев и др. Под ред. Л.Б. Масандилова, 2012. – 520 с.

Доманов Виктор Иванович

Родился в 1950 году. В 1972 году окончил 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, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет 144 научных труда, автор 16 изобретений.

Доманов Андрей Викторович

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил 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, директор Экспертно-аналитического центра НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Имеет 107 научных трудов, автор 11 изобретений.

Альтахер Аббас А. Карим

Родился в 1971 году. В 2006 году окончил Технологический институт в Багдаде (Ирак). Аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет публикации в области электромеханики.

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, Head of Department «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, Director of Expert-Analytical Center SRTI of Ulyanovsk State University. He has 107 scientific publications, author of 11 inventions.

Altaher Abbas A. Karim

Was born in 1971. In 2006 he graduated from Institute of Technology in Baghdad (Iraq). Post-graduate of Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has published articles in the field of electrical engineering.

Анализ методов расчета токов короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ-11

// Analysis of methods for calculation of short-circuit currents of transformer with windings connected in Y/Δ-11 arrangement //

Серебряков А.С., д. т. н., профессор,
Герман Л.А., д. т. н., профессор,
Нижегородский филиал МГУПС (МИИТ), г. Нижний Новгород
Осокин В.Л., к. т. н., доцент,
Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет, г. Княгинино
Субханвердиев К.С.,
«Трансэлектропроект» – филиал ОАО «Росжелдорпроект»,
Москва

Показано, что при соединении обмоток трехфазного трансформатора по схеме Y/Δ-11, когда отсутствуют составляющие тока нулевой последовательности, первичные и вторичные токи определяются из условия равновесия первичных и вторичных магнитодвижущих сил. В силу этого нет необходимости раскладывать токи на симметричные составляющие, и можно значительно упростить задачу анализа, сведя ее (пренебрегая токами намагничивания) к расчету обычной электрической цепи с тремя неизвестными токами. В качестве примера приведен расчет режима двухфазного короткого замыкания. Даны соотношения для расчета тока двухфазного короткого замыкания. Отмечено, что объединение контактной сети с рельсами в схеме замещения тяговой сети полностью отвечает условию расчета. Предложена новая эквивалентная схема замещения при расчете токов короткого замыкания при двухсторонней схеме питания тяговой сети, применение которой обеспечивает необходимую точность расчета и устраняет неопределенность в выборе отдельных его параметров.
Ключевые слова: трехфазный трансформатор, схема соединения обмоток трансформатора «Звезда – треугольник», короткое замыкание, сопротивление короткого замыкания, сопротивление двухфазного короткого замыкания.

*It is shown that with the windings of a three-phase transformer connected in the Y/Δ-11 arrangement, where there are no zero-sequence current components, the primary and secondary currents are determined from the condition of equilibrium of the primary and secondary magnetomotive forces. Because of this, there is no need to decompose currents into symmetric components, and it is possible to simplify the analysis problem considerably by reducing it to calculating an ordinary electric circuit with three unknown currents, with the magnetization currents neglected. As an example, a calculation of the two-phase short-circuit mode is given. Relations are given for calculating the two-phase short circuit current. It is noted that association of the catenary with the rails in the equivalent circuit of the traction network fully meets the calculation condition. A new equivalent circuit is proposed for calculation of short-circuit currents, which, when applied, ensures the necessary accuracy of calculation and eliminates the uncertainty in selection of its individual parameters.
Keywords: three-phase transformer, star-delta winding connection arrangement, short circuit, short-circuit resistance, two-phase short-circuit resistance.*

Постановка задачи

Схема соединений Y/Δ-11 применяется для питания участков электрифицированной железной дороги напряжением 27,5 кВ [1–3]. Наиболее опасными для трансформаторов в эксплуатации являются аварийные режимы, вызванные короткими замыканиями (КЗ) [4–6]. Чаще всего они происходят при замыкании контактного провода на рельс. Для разработки современных цифровых систем релейной защиты для быстрого обнаружения и ликвидации КЗ, а также для оценки остаточного ресурса трансформаторов необходимо исследовать количественные соотношения при аварийных режимах.

В руководящих указаниях по релейной защите систем тягового электропитания [15, (4.2)] предлагается формула для расчета тока двухфазного КЗ в тяговой сети, где удвоенному значению подстанции Z_{Π} равно удвоенному значению суммы сопротивлений фазы трансформатора Z_K и системы внешнего электропитания Z_C :

$$Z_{\Pi} \approx X_{\Pi} = 2U_{\text{H}}^2 \left[\frac{1}{S_C} + \frac{u_{\text{K}}\%}{100S_{\text{H}}n} \right] = 2(Z_C + Z_K), \quad (1)$$

где $u_{\text{K}}\%$ – паспортное значение сопротивления короткого замыкания трансформатора; S_{H} – номинальная мощность трансформатора; n – количество включенных на подстанции трансформаторов; S_C – мощность короткого замыкания на вводе в подстанцию; Z_{Π} – полное сопротивление подстанции; X_{Π} – индуктивное сопротивление подстанции; U_{H} – напряжение на выводах тяговой обмотки трансформатора, кВ, если нет более точных данных, то принимается номинальное напряжение 27,5 кВ.

Удвоение сопротивления фазы в формуле (1) для схемы соединения «Звезда – треугольник» не является очевидным и в некоторых случаях

вызывает сомнения. Обратим внимание, что сопротивления фазы трансформатора Z_K и системы внешнего электроснабжения Z_C в соответствии с (1) определяются по формулам

$$Z_C \approx X_C = \frac{U_H^2}{S_C}, \quad (1a)$$

$$Z_K \approx X_K = \frac{u_K \% U_H^2}{100 S_H n}, \quad (16)$$

которые справедливы для схемы соединения обмоток трансформатора «Звезда – звезда».

Уточним исходные данные и дальнейшие обозначения в статье.

В трансформаторе со схемой соединения Y/Δ фазные и линейные напряжения тяговой обмотки равны, а в схеме соединения Y/Y фазное напряжение тяговой обмотки в $\sqrt{3}$ меньше линейного. Сопротивление фазы трансформатора при соединении Y/Δ (обозначим $Z_{ФП}$) в три раза больше, чем при соединении Y/Y (Z_K).

Справедливость формулы (1) можно проверить, если вторичную обмотку

трансформатора «Треугольник» преобразовать в «Звезду» (рис. 1), как это делается для расчетов некоторых режимов тяговой сети [18]. Тогда видно, что при двухфазном КЗ одинаковый ток, равный току КЗ, протекает по двум фазам трансформатора и питающей его линии ВЛ-110 (220) кВ (рис. 1б) и сомнения в удвоении сопротивлений нет. Однако в преобразованной схеме ток КЗ протекает только по двум фазам, хотя в действительности при соединении тяговой обмотки в «Треугольник» ток протекает во всех трех фазах (рис. 1а, 1б). Кроме того, на рис. 1а значения токов в фазах получаются другими, отличными от тока КЗ (рис. 1б). Поэтому некоторые специалисты считают, что в этом случае преобразование «Треугольника» в «Звезду» недопустимо. Таким образом, задача статьи состоит в доказательстве правильности удвоения в формуле расчета сопротивления цепи короткого замыкания, данной в [15] без преобразования «Треугольника» в «Звезду».

Кроме того, в основном учебнике по электроснабжению железных дорог [2] для сопротивления фазы трансформатора со схемой соединений Y/Δ -11, приведенного к номинальному напряжению тяговой обмотки, предлагается следующая формула, дающая значение сопротивления КЗ трансформатора, отличающееся от значения, полученного по формуле (1), в три раза:

$$Z_T \approx X_T = \frac{u_K \% 3 U_H^2}{100 S_H}. \quad (2)$$

Итак, окончательно сформулируем задачи статьи:

- оценить области применения формул (1) и (2) в расчетах нормальных и аварийных режимов системы тягового электроснабжения переменного тока;
- пояснить правила и методы вывода формулы (1) для расчета токов КЗ и, в частности, доказать приемлемость в этом случае преобразования трансформатора от Y/Δ к схеме Y/Y ;
- следует дополнительно выяснить недостатки применения формулы (1) для расчетов токов КЗ в тяговой сети при двухсторонней схеме питания в случае использования значений мощности короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций.

Расчеты основных соотношений при определении токов КЗ трансформатора

Рассмотрим короткое замыкание только в одном плече тяговой подстанции, нагрузка в другом плече отсутствует. При условии, что намагничивающие токи трансформатора равны нулю и в первичной и вторичной обмотках отсутствуют токи нулевой последовательности, на каждом стержне магнитопровода трансформатора, то есть в каждой фазе, должно существовать равенство первичной и вторичной МДС. Это значит, что для приведенного трансформатора должно существовать равенство первичных и вторичных токов в каждой фазе [4–12]. Другими словами, каждая фаза будет работать независимо. Действительно, как указано в [13], при наличии одной из обмоток, соединенной в «Треугольник», центр звезды фазных напряжений другой обмотки, соединенной в «Звезду», совпадает с центром тяжести треугольника линейных напряжений. Токи нулевой последовательности в обмотку, соединенную треугольником, из других обмоток не трансформируются. Следовательно, сумма мгновенных

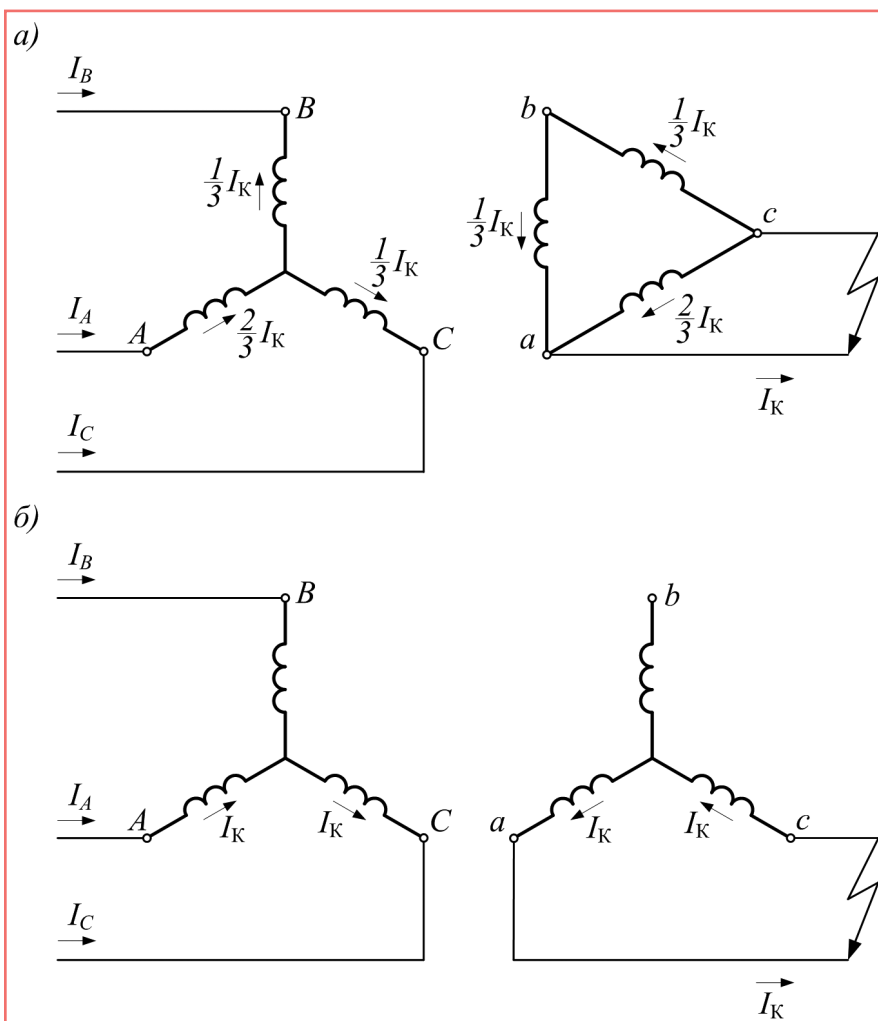


Рис. 1. Трансформатор со схемой соединения Y/Δ (а) и с преобразованием вторичной обмотки «Треугольник» в «Звезду» – Y/Y (б)

токов в ней равна нулю, и каждая его фаза работает независимо.

Подчеркнем, что при расчетах несимметричных режимов в трехфазных трансформаторах при отсутствии токов нулевой последовательности, когда приведенные токи в фазах обмоток трансформатора равны, сопротивления короткого замыкания первичной и вторичной обмоток не разделяются, а берутся как одно целое [13].

Разделять сопротивления первичной и вторичной обмоток при расчетах несимметричных режимов следует только при наличии токов нулевой последовательности, когда приведенные токи в фазах первичной обмотки не равны токам в фазах вторичной обмотки [13].

Схема замещения тягового трансформатора и расчетные схемы при двухфазном коротком замыкании представлены на рис. 2, где I_K – ток одного плеча при коротком замыкании.

Здесь $Z_{ФП} = Z_{ФК} + Z_{ФС}$ – приведенное суммарное сопротивление короткого замыкания на фазу трансформатора со схемой Y/Δ [13]; $Z_{ФК}$ – приведенное сопротивление КЗ фазы тягового трансформатора; $Z_{ФС}$ – приведенное сопротивление КЗ фазы системы внешнего электроснабжения; $Z_{ТСЗ}$ – приведенное сопротивление тяговой сети и переходное сопротивление в месте КЗ.

Расчеты трансформатора со схемой Y/Δ

Сопротивление короткого замыкания для одной фазы тягового трансформатора находится по формуле

$$Z_{ФК} = \frac{u_K \% U_H}{100 I_{ФН}} = \frac{u_K \% U_H}{100 \frac{S_{ФН}}{U_{ФН}}} = \frac{u_K \% U_H^2}{100 S_{ФН}} = \frac{u_K \% U_H^2}{100 \frac{S_H}{3}} = \frac{u_K \% 3 U_H^2}{100 S_H}, \quad (3)$$

где U_H – номинальное напряжение на выводах тяговой обмотки трансформатора; $I_{ФН}$ – номинальный фазный ток трансформатора; $S_{ФН}$ – номинальная мощность одной фазы трансформатора, $S_H = 3 S_{ФН}$ – номинальная мощность трансформатора, $u_K \%$ – паспортное значение напряжения короткого замыкания тягового трансформатора. Формула (3) совпадает с формулой (3.140) в [2].

Если у тягового трансформатора номинальной мощностью, например, 40 МВ·А с напряжениями 110/27,5 кВ паспортное значение напряжения короткого замыкания $u_K \%$ составляет 10,5%, то сопротивление короткого замыкания $Z_{ФК}$ одной фазы, приведенное к вторичной стороне трансформатора ($U_H = 27,5$ кВ), в соответствии с (3) будет равно

$$Z_{ФК} = \frac{u_K \% 3 U_H^2}{100 S_H} = \frac{10,5 \cdot 3 \cdot 27500^2}{100 \cdot 40 \cdot 10^6} = 6 \text{ Ом}. \quad (4)$$

Сопротивление системы внешнего электроснабжения на одну фазу, выраженное через мощность S_C короткого замыкания на вводе в подстанцию и приведенное к напряжению 27,5 кВ, составит

$$Z_{ФС} = \frac{U_H^2 3}{S_C} = \frac{27500^2 \cdot 3}{1000 \cdot 10^6} = 2,27 \text{ Ом}, \quad (5)$$

где U_H – номинальное напряжение на выводах тяговой обмотки трансформатора (27,5 кВ); $S_C = 1000$ МВ·А – мощность короткого замыкания на вводе в подстанцию. Если сопротивление системы внешнего электроснабжения на фазу задано в омах на первичной стороне трансформатора, то его приводят к напряжению 27,5 кВ с помощью коэффициента трансформации фазных напряжений, который для данного трансформатора

равен $115/(\sqrt{3} \cdot 27,5) = 2,309$. Таким образом, сопротивление одной фазы тяговой подстанции будет равно

$$Z_{ФП} = Z_{ФК} + Z_{ФС} = \frac{u_K \% 3 U_H^2}{100 S_H} + \frac{U_H^2 3}{S_C} = \frac{10,5 \cdot 3 \cdot 27500^2}{100 \cdot 40 \cdot 10^6} + \frac{27500^2 \cdot 3}{1000 \cdot 10^6} = 6 + 2,27 = 8,27 \text{ Ом}. \quad (6)$$

Расчеты трансформатора со схемой Y/Y

При двухфазном замыкании на выводах тяговой обмотки (рис. 2) обмотка одной фазы А оказывается соединенной параллельно с двумя соединенными последовательно обмотками фаз В и С. В обеих ветвях действуют одинаковые по модулю и фазе источники ЭДС, поскольку $\underline{E}_A = -\underline{E}_B - \underline{E}_C$. Но при этом сопротивления ветвей разные: сопротивление одной фазы равно $Z_{ФП}$, а другой – в два раза больше, то есть $2Z_{ФП}$. Таким образом, сопротивление тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании будет равно

$$Z_{П} = \frac{Z_{ФП} \cdot 2Z_{ФП}}{Z_{ФП} + 2Z_{ФП}} = \frac{2}{3} Z_{ФП} = \frac{2}{3} 8,27 = 5,51 \text{ Ом}. \quad (7)$$

Формулу (7) для внутреннего сопротивления тяговой подстанции можно преобразовать к виду

$$Z_{П} = \frac{Z_{ФП} \cdot 2Z_{ФП}}{Z_{ФП} + 2Z_{ФП}} = \frac{2}{3} Z_{ФП} = \frac{2}{3} \left[\frac{u_K \% 3 U_H^2}{100 S_H} + \frac{U_H^2 3}{S_C} \right] = \frac{2 u_K \% U_H^2}{100 S_H} + \frac{2 U_H^2}{S_C} = 2 \left[\frac{u_K \% U_H^2}{100 S_H} + \frac{U_H^2}{S_C} \right] = 2(Z_K + Z_C), \quad (8)$$

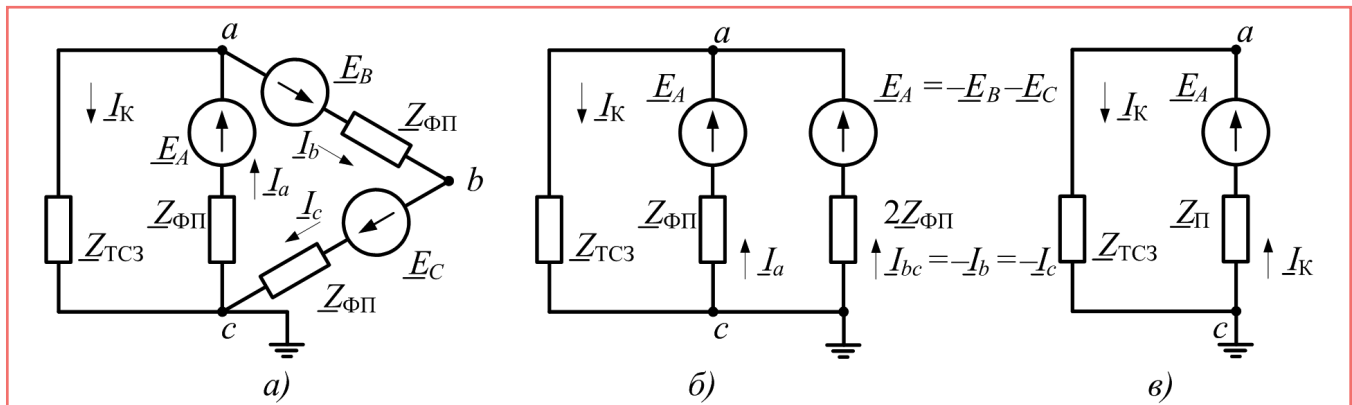


Рис. 2. Схема замещения тягового трансформатора при двухфазном коротком замыкании (а), промежуточная (б) и окончательная (в) расчетные схемы

где

$$Z_K = \frac{u_K \% U_H^2}{100 S_H} = \frac{10,5 \cdot 27500^2}{100 \cdot 40 \cdot 10^6} = 2 \text{ Ом} \quad (9)$$

Z_K – сопротивление короткого замыкания тягового трансформатора в соответствии с формулой (1);

$$Z_C = \frac{U_H^2}{S_C} = \frac{27500^2}{1000 \cdot 10^6} = 0,775 \text{ Ом} \quad (10)$$

Z_C – сопротивление короткого замыкания системы внешнего электроснабжения в соответствии с формулой (1).

Заметим, что полученные по формулам (9) и (10) сопротивления соответствуют сопротивлениям короткого замыкания при соединении обеих обмоток трансформатора в «Звезду». В этом случае напряжение на выводах обмотки тягового трансформатора рассматривается как линейное.

Если в формулу (8) ввести заводской допуск $\pm \alpha$ на величину напряжения короткого замыкания тягового трансформатора и число n параллельно включенных в работу трансформаторов, то получится формула для сопротивления тяговой подстанции, данная в руководящих указаниях [15]:

$$Z_{\Pi} = 2 \left[\frac{u_K \% (1 \pm \alpha) U_H^2}{100 S_H n} + \frac{U_H^2}{S_C} \right] = 2(Z_K + Z_C) = 2(2 + 0,775) = 5,51 \text{ Ом}. \quad (11)$$

Ток короткого замыкания на выводах подстанции без учета переходного сопротивления в месте короткого замыкания

$$I_K = \frac{U_H}{Z_{\Pi}} = \frac{U_H}{2(Z_K + Z_C)} = \frac{27500}{5,51} = 5000 \text{ А} = 5 \text{ кА}. \quad (12)$$

С учетом сопротивления тяговой контактной сети $Z_{TC} = 1 \text{ Ом}$ и переходного сопротивления в месте КЗ $Z_3 = 0,4 \text{ Ом}$ формула для расчета тока короткого замыкания будет выглядеть так:

$$I_K = \frac{U_H}{Z_{\Pi} + Z_{TC} + Z_3} = \frac{U_H}{2(Z_K + Z_C) + Z_{TC} + Z_3} = \frac{U_H}{2(Z_K + Z_C) + Z_{TC3}} = \frac{27500}{2(2 + 0,775) + 1 + 0,4} =$$

$$= \frac{27500}{5,51 + 1,4} = \frac{27500}{6,91} = 4000 \text{ А} = 4 \text{ кА}, \quad (13)$$

где $Z_{TC3} = Z_{TC} + Z_3$ – сопротивление тяговой сети с учетом переходного сопротивления в месте короткого замыкания.

Итак, без преобразования схемы вторичной обмотки трансформатора из «Треугольника» в «Звезду» получены формулы для практических расчетов и установлены следующие важные положения:

- если сопротивление фазы трансформатора и системы внешнего электроснабжения определяют по формулам (1а) и (1б) (без коэффициента 3 в числителе дроби), то по умолчанию для расчета принимается схема соединения обмоток «Звезда – звезда» и сопротивление подстанции определяется по формуле (1) как удвоенное сопротивление фазы;

- если сопротивление фазы трансформатора и системы внешнего электроснабжения определяют по формуле (3) (с коэффициентом 3 в числителе дроби), то по умолчанию для расчета принимается схема соединения обмоток «Звезда – треугольник» и сопротивление подстанции определяется по формуле (7) как две трети сопротивления фазы. В обоих случаях результат получается одинаковым, так как сопротивления фазы трансформатора в схемах Y/Δ и Y/Y отличаются в три раза;

- во всех случаях расчеты, связанные с измерениями реальных токов и напряжений трансформатора Y/Δ (например, расчеты расхода электроэнергии, остаточного ресурса трансформатора и т.д.), нужно проводить по формулам (3) и (4), то есть с реальным сопротивлением вторичной обмотки «Треугольник». При этом целесообразно измерения токов выполнять на первичной обмотке трансформатора;

- если требуется проводить расчеты токов КЗ в тяговой сети, то сопротивление подстанции определяется по формуле (7) или (8), то есть для условий трансформатора со схемой Y/Y. Причем формула (8) совпадает с формулой (4.2) в Руководящих указаниях [15]. Другими словами, доказано, что применяемая формула (4.2) в [15] может быть получена и без преобразования схемы соединения трансформатора из Y/Δ в Y/Y, и с преобразованием.

Расчеты токов КЗ с использованием метода симметричных составляющих

Известно, что для расчетов несимметричных режимов в большинстве случаев применяют методы симметричных составляющих. Используя указанный метод, докажем справедливость формулы (1). Для простоты ограничимся рассмотрением одного трансформатора, то есть рассмотрением формулы (7).

При одноплечей нагрузке (при КЗ на одной фазе (на одном плече), при отсутствии нагрузки на других фазах) из [20]

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{обр}}, \quad (14)$$

где $I_{\text{пр}}$ и $I_{\text{обр}}$ – токи прямой и обратной последовательности трансформатора.

Здесь

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{обр}} = \frac{1}{3} I_K, \quad (15)$$

где I_K – ток плеча, то есть ток КЗ.

Тогда при равных сопротивлениях прямой и обратной последовательности трансформатора $Z_{\text{пр}} = Z_{\text{обр}}$ равны падения напряжения прямой и обратной последовательности:

$$\Delta U_{\text{пр}} = \Delta U_{\text{обр}}, \quad (16)$$

где

$$\Delta U_{\text{пр}} = I_{\text{пр}} Z_{\text{пр}}, \\ \Delta U_{\text{обр}} = I_{\text{обр}} Z_{\text{обр}}.$$

Реальное падение напряжения, например, на фазе a :

$$\Delta U_a = \Delta U_{a\text{пр}} + \Delta U_{a\text{обр}}, \quad (17)$$

где $\Delta U_{a\text{пр}}$, $\Delta U_{a\text{обр}}$ – падения напряжения прямой и обратной последовательности фазы a .

Из (17)

$$\Delta U_a = I_{\text{пр}} Z_{\text{пр}} + I_{\text{обр}} Z_{\text{обр}} = \frac{I_K}{3} (Z_{\text{пр}} + Z_{\text{обр}})$$

и при $Z_{\text{пр}} = Z_{\text{обр}}$

$$\Delta U_a = \frac{2}{3} I_K Z_{\text{пр}}. \quad (18)$$

Сопротивление $Z_{\text{пр}}$ равно сопротивлению фазы трансформатора $Z_{\text{ФП}}$. Таким образом, из (18) получим

$$Z_{\Pi} = \frac{2}{3} Z_{\text{ФП}},$$

что соответствует формуле (7).

Расчет токов КЗ при двухсторонней схеме питания тяговой сети

По формуле (13) проводят расчеты токов КЗ при одностороннем питании тяговой сети с добавлением сопротивления тяговой сети в знаменатель (без удвоения). Далее рассмотрим

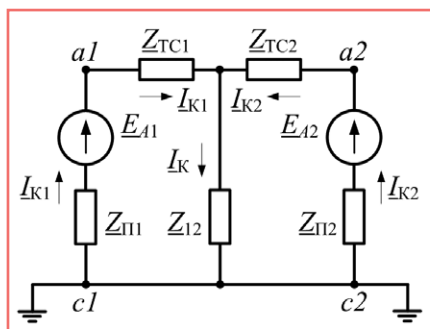


Рис. 3. Схема замещения режима короткого замыкания электрифицированного участка железной дороги при двухстороннем питании

особенности расчетов токов КЗ при двухстороннем питании тяговой сети.

При двухстороннем питании электрифицированного участка железной дороги схема замещения при коротком замыкании показана на рис. 3. Она соответствует Руководящим указаниям по релейной защите [15]. Здесь сопротивление тяговой сети представлено суммой индуктивно развязанных сопротивлений контактной сети и рельсовой цепи, а сопротивление введенной цепи $c1 - c2$ равно нулю. Короткое замыкание представлено цепью с сопротивлением Z_{12} . На рис. 3 обозначены: E_{A1} и E_{A2} – эквивалентные ЭДС, равные ЭДС в фазах А вторичных обмоток тяговых трансформаторов первой и второй подстанции, называемые в Руководящих указаниях [15] расчетными напряжениями; $Z_{П1}$ и $Z_{П2}$ – сопротивления первой и второй тяговых подстанций; Z_{TC1} , Z_{TC2} – сопротивления тяговой сети на первом и втором участках межподстанционной зоны; Z_{12} – сопротивление в месте короткого замыкания; I_{K1} , I_{K2} , I_K – токи короткого замыкания фидеров первой и второй подстанции и в месте КЗ.

Для расчета токов короткого замыкания при двухстороннем питании электрифицированного участка составляется система уравнений:

$$I_{K1} + I_{K2} - I_K = 0, \quad (19)$$

$$(Z_{П1} + Z_{TC1})I_{K1} + Z_{12}I_K = E_{A1}, \quad (20)$$

$$(Z_{П2} + Z_{TC2})I_{K2} + Z_{12}I_K = E_{A2}. \quad (21)$$

Запишем уравнения (19–21) в матричной форме, заменив источники ЭДС соответствующими напряжениями:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ Z_1 & 0 & Z_{12} \\ 0 & Z_2 & Z_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{K1} \\ I_{K2} \\ I_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U_{A1} \\ U_{A2} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Решая систему уравнений (22), получим

$$I_{K1} = \frac{(Z_{12} + Z_2)U_{A1} - Z_{12}U_{A2}}{(Z_1 + Z_2)Z_{12} + Z_1Z_2}, \quad (23)$$

$$I_{K2} = \frac{(Z_{12} + Z_1)U_{A2} - Z_{12}U_{A1}}{(Z_1 + Z_2)Z_{12} + Z_1Z_2}, \quad (24)$$

$$I_K = \frac{Z_2U_{A1} + Z_1U_{A2}}{(Z_1 + Z_2)Z_{12} + Z_1Z_2}. \quad (25)$$

Обычно такой расчет токов КЗ требуется выполнять как при проектировании, так и в эксплуатации [15]. Как указано, в тяговой сети рассматривается сумма сопротивлений контактной сети и рельсов, а сопротивление цепи $c1 - c2$ нулевое. Если нет необходимости отдельно рассматривать электромагнитные процессы в рельсовой цепи, то для расчета токов КЗ объединение контактной сети с рельсами вполне оправдано.

Тем не менее укажем недостатки эквивалентной схемы замещения для расчета токов КЗ в тяговой сети, приведенной в [15] и показанной на рис. 3:

- в схеме замещения отсутствует электрическая связь двух смежных тяговых подстанций по сети СВЭ 110 (220) кВ, что изменяет при коротком замыкании реальное токораспределение в тяговой сети;

- введение двух ЭДС как источников питания на тяговых подстанциях вызывает неопределенность в выборе расчетного напряжения на тяговых подстанциях, и поэтому в расчетах предлагается принимать максимальное или минимальное напряжение (27,5 кВ плюс-минус 5%).

Указанные недостатки схемы замещения приводят к методической погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети при ее двустороннем питании.

Формирование новой схемы замещения для расчета токов КЗ в тяговой сети переменного тока системы 25 кВ с двусторонним питанием

Снижение методической погрешности в вычислении токов КЗ при двухсторонней схеме питания тяговой сети требует разработки новой схемы замещения межподстанционной зоны тяговой сети с введением в нее параметров эквивалентной схемы сети энергосистемы.

За основу схемы принимаем схему замещения электроснабжения контактной сети с односторонним питанием

[21, рис. 13]. Схема замещения (рис. 4а) образована тремя элементами: сопротивлениями линии ВЛ110 (220) кВ Z_S , силового трансформатора Z_{TP} тяговой подстанции и тяговой сети Z_{TC} с КЗ.

В схеме замещения на рис. 4б указаны сопротивления питающей линии и трансформатора на фазу и двухфазная цепь с КЗ в виде сопротивления тяговой сети. Сопротивления питающей линии и трансформатора в данной схеме замещения вследствие объединения идентичных элементов сопротивлений на рис. 4а запишутся с коэффициентом 2, тем самым составив окончательную схему замещения для расчета токов КЗ в тяговой сети с односторонним питанием. Все сопротивления приводим к одному напряжению тяговой обмотки, напряжение источника питания (а не тяговой подстанции) E принимаем номинальным 27,5 кВ или устанавливаем по соответствующим требованиям нормативного документа [15].

Для формирования схемы двустороннего питания добавляем силовой трансформатор второй тяговой подстанции и вторую линию ВЛ-110 (220) кВ

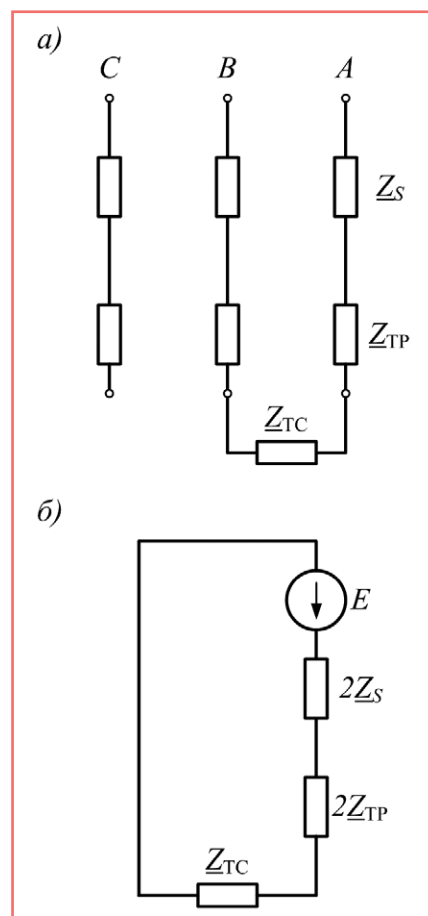


Рис. 4. Схема замещения при одностороннем питании

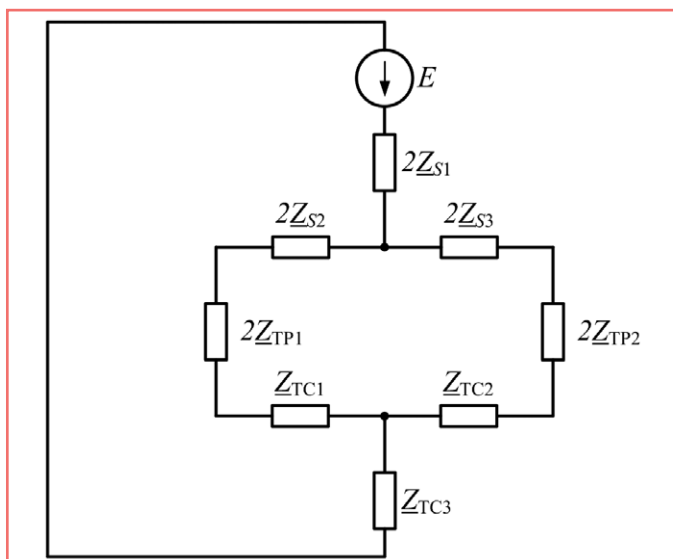


Рис. 5. Схема замещения при двухстороннем питании

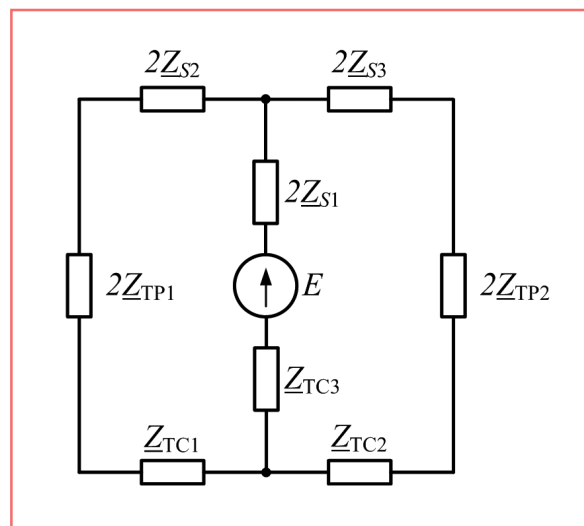


Рис. 6. Схема замещения для расчета токов короткого замыкания при учете схемы внешнего электроснабжения

(рис. 5). Трехлучевой схемой замещения Z_{S1} , Z_{S2} , Z_{S3} можно представить любую схему замещения системы внешнего электроснабжения. Причем взаимное сопротивление Z_{S1} будет определять взаимную связь между подстанциями по сетям внешнего электроснабжения (рис. 6).

Один же источник питания с соответствующим подсоединением к двум тяговым подстанциям исключает неопределенность в определении их напряжений холостого хода.

Тяговую сеть с цепью КЗ представляем также трехлучевой схемой замещения по аналогии с [15] с сопротивлениями Z_{TC1} , Z_{TC2} , Z_{TC3} . Параметры тяговой сети даны в [15].

В схемах замещения (рис. 4, 5, 6) приняты следующие обозначения:

Z_{S1} , Z_{S2} , Z_{S3} – сопротивления трех лучей системы внешнего электроснабжения, питающей две тяговые подстанции на фазу;

Z_{TP1} , Z_{TP2} – сопротивления силовых трансформаторов тяговых подстанций на фазу;

Z_{TC1} , Z_{TC2} , Z_{TC3} – сопротивления трех лучей эквивалентной схемы замещения тяговой сети с КЗ и двухсторонним питанием.

Укажем, что расчеты и опыт эксплуатации [19] доказывают большую погрешность (50% и более) в расчетах токов КЗ по схеме замещения в нормативном документе [15].

Следует отметить, что при проектировании, как правило, неизвестна прилегающая к тяговой подстанции схема внешнего электроснабжения. Поэтому приходится ограничиваться мощностью

короткого замыкания, предоставленной энергосистемой. Однако на действующей тяговой подстанции при известной прилегающей схеме внешнего электроснабжения уточняющие расчеты по рассматриваемой новой схеме электроснабжения обязательны. Более того, рекомендуется на участках, где мощность КЗ на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций не превышает 1000 МВА, проводить опытные КЗ для определения минимальных токов КЗ в тяговой сети. Как было указано в [19], эксперименты на одном участке Горьковской железной дороги показали, что реальные токи КЗ меньше рассчитанных по методике [15] в полтора раза.

Выводы

1. С помощью различных методов расчета доказано, что применяемая формула расчета сопротивления тяговой подстанции в Руководящих указаниях по релейной защите [15] может быть получена как с преобразованием, так и без преобразования схемы соединения трансформатора из Y/Δ в Y/Y .

2. Во всех случаях расчеты, связанные с измерениями реальных токов и напряжений трансформатора Y/Δ (например, расчеты расхода электроэнергии, остаточного ресурса изоляции трансформатора и т. д.), нужно проводить по формулам (3) и (4), то есть с реальным сопротивлением вторичной обмотки «Треугольник». При этом целесообразно измерения токов выполнять на первичной обмотке трансформатора.

Если требуется проводить расчеты токов КЗ в тяговой сети, то сопротивление подстанции определяется по

формуле (7) или (8), то есть для условий трансформатора со схемой Y/Y . Причем формула (8) совпадает с формулой (4.2) в Руководящих указаниях [15]. Другими словами, доказано, что применяемая формула (4.2) в [15] может быть получена и без преобразования схемы соединения трансформатора из Y/Δ в Y/Y , и с преобразованием.

3. В существующей схеме замещения для расчетов токов КЗ по нормативным документам методическая погрешность определяется следующим:

- в схеме замещения отсутствует электрическая связь двух смежных тяговых подстанций по сети СВЭ 110 (220) кВ, что изменяет при коротком замыкании реальное токораспределение в тяговой сети;

- введение двух ЭДС как источников питания на тяговых подстанциях вызывает неопределенность в выборе расчетного напряжения на тяговых подстанциях.

4. Предложена новая схема замещения, устраняющая указанную методическую погрешность расчетов при двухсторонней схеме питания, отличающаяся тем, что в схему замещения [15] введена схема внешнего электроснабжения в виде трехлучевой звезды с сопротивлениями Z_{S1} , Z_{S2} , Z_{S3} , которая подключается сопротивлениями Z_{S2} и Z_{S3} к трансформаторам тяговых подстанций (Z_{I11} и Z_{I12}), а сопротивлением Z_{S1} – к источнику питания энергосистемы. Причем сопротивление Z_{S1} определяет взаимную связь между подстанциями по сетям внешнего электроснабжения, что реально существует.

Литература

1. Винокуров В.А., Попов Д.А. Электрические машины железнодорожного транспорта. Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.
 2. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
 3. Серебряков А.С. Трансформаторы: учебное пособие / А.С. Серебряков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 360 с.
 4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
 5. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов. Учебное пособие для студентов вузов и СПО. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 176 с.
 6. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
 7. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2 частях. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для студентов вузов. Изд. 3-е, перераб. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с.
 8. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика. Учебник для студентов вузов / под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 512 с.
 9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
 10. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 320 с.
 11. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
 12. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2000.
 13. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3 частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
 14. Алексеенко Е.А., Булатов Ю.Н., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения железных дорог / под ред. А.В. Крюкова: монография. – Иркутск: ИргУПС, 2016. – 169 с.
 15. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. – М.: ТРАНЗИЗДАТ, 2005. – 216 с.
 16. СТО РЖД 07.021.4–2015 «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока».
 17. ГОСТ Р 52735–2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 2007. – 36 с.
 18. Бородудин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
 19. Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока при учете внешнего электроснабжения // Электроника и электрооборудование транспорта. № 3. – 2017. С. 17–23.
 20. Тамазов А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. – М.: Транспорт, 1965. – 236 с.
 21. Кучма К.Г., Марквардт Г.Г., Пупынин В.Н. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – 260 с.
- Серебряков Александр Сергеевич**
Родился в 1939 году. В 1961 году окончил Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок». Доктор технических наук, профессор. Защитил докторскую диссертацию на тему «Методы и средства диагностики изоляции электрических машин и аппаратов их защиты». В настоящее время работает профессором кафедры «Электрификация и электроснабжение» Нижегородского филиала МГУПС (МИИТ). Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Автор более 300 научных работ, в том числе 10 книг. Имеет более 50 авторских свидетельств и патентов на изобретения.
- Герман Леонид Абрамович**
Родился в 1937 году. Окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик» (1959 год). 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, член-корреспондент Российской Академии транспорта. Автор более 350 научных трудов, 70 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.
- Осокин Владимир Леонидович**
Родился в 1976 году. В 1998 году окончил Нижегородскую государственную сельскохозяйственную академию. Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Повышение эффективности функционирования электрических подогревателей воды путем разработки стенда для их тестирования». В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (НГИЭУ). Опубликовал 10 печатных работ, 2 монографии, получил 1 патент на изобретение.
- Субханвердиев Камиль Субханвердиевич**
Родился в 1989 году. В 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электро-
- снабжение железных дорог». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает инженером I категории в Проектно-исследовательском институте электрификации железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект» – филиале ОАО «Росжелдорпроект». Имеет 4 научные статьи.
- Serebryakov Alexander**
He was born in 1939. In 1961 he graduated from Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev majoring in «Electrification of industrial enterprises and plants». He is Doctor of Technical Sciences, professor. He defended the dissertation with topic «Methods and means of diagnostics of insulation of electrical machines and devices of its protection». At present he works as professor of «Electrification and power supply» department of Nizhny Novgorod branch of Moscow State University of Railway Engineering. He is corresponding member of the Academy of electro technical sciences. He is author of more than 300 scientific papers, including 10 books. He has more than 50 certificates of authorship and patents for inventions.
- 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.
- Osokin Vladimir**
Was born in 1976. In 1998 he graduated from Nizhny Novgorod State Agricultural Academy. He is candidate of Technical Sciences, associated professor. In 2011 he defended the dissertation with topic «Increasing the efficiency of electric water heaters by developing its test facility». At present he works as Chief of «Electrification and automation» department of Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics. He published 10 papers, 2 monographs, 1 patent for invention.
- Subhanverdiev Kamil'**
Was born in 1989. In 2012 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering with specialization «Railways electric power supply». He has 5 years of work experience. At present, he works as a first class engineer at Design and survey institute of railways electrification and electric power plants «Transelectroproject» – branch of «Roszheldorproject». He has 4 scientific works.

Анализ колебаний в механических системах на основе аналогий с электрическими цепями

// Analysis of vibrations in mechanical systems on the basis of analogies with electric circuits //

Горский А.Н., д.т. н., профессор,
Чернышева Ю.В.,
ФБОУ ВО ПГУПС, Санкт-Петербург

В статье подробно рассмотрены вопросы аналогии исследования колебательных процессов в механических системах и электрических цепях. Показано, что в электрических цепях решение получить проще, оно будет нагляднее, а иногда и более полно. Выполнен расчет вынужденных колебаний для вынуждающей силы, имеющей гармонический и импульсный характер. Полученные решения могут быть использованы при анализе колебательных процессов в различных механических системах, в том числе в системе «Колесо – рельс». Ключевые слова: механическая система, электрическая цепь, вынужденные колебания, аналоговое моделирование, масса, жесткость, коэффициент трения, обобщенная координата, электрический заряд, импульс, возмущающая сила.

The article discussed the analogy of the study of oscillatory processes in mechanical systems and electrical circuits. It is shown that the decision in electrical circuits is simpler and clearer, and sometimes more fully. Here was made the calculation of forced vibrations for the driving force having harmonic and impulsive character. The solution can be used in the analysis of oscillatory processes in mechanical systems, such as system «Wheel – rail».

Keywords: mechanical systems, electrical circuit, forced vibrations, analog simulation, weight, stiffness, the coefficient of friction, generalized coordinate, electric discharge/charge, impulse.

В 1873 году Д.Максвелл рассмотрел соответствие электрической цепи механической колебательной системе. В основу электромеханической аналогии было положено соответствие между электрическим током и скоростью материальной точки. В таблице 1 представлена эта аналогия [1]. Существуют и другие системы электромеханических

аналогий. Они дают возможность описывать механические колебательные системы и электрические цепи одинаковыми дифференциальными уравнениями.

Электрическая схема является тематической моделью различного рода электромеханических устройств и электрических аппаратов. Поэтому

при использовании аналогий с электрическими цепями инженеры-механики называют этот метод аналоговым моделированием.

Теория электрических цепей является разделом электротехники, рассматривающим в числе других электрические колебания. В электрических цепях переменные величины являются одномерными – измеряются во времени. Поэтому они описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, которые определяются пассивными элементами: активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью. В механических системах, состоящих из механических элементов (масс, пружин, демпферов), тоже происходят одномерные колебания. Если в механической системе возникают двухмерные колебания (например, в функции координаты и времени), то ей должна соответствовать электрическая цепь с распределенными параметрами, процессы в которой описываются уравнениями в частных производных в функции тех же аргументов. Количество независимых переменных, необходимых для анализа движения элементов колебательной системы, определяется числом степеней свободы системы. В электрической системе число степеней свободы соответствует числу токов в ветвях.

В настоящее время теория электрических цепей разработана достаточно полно, поэтому инженеры-механики могут применять эти знания для решения задач о возникающих колебаниях в различных механических системах. В статье приведены примеры исследования таких колебаний.

Пример 1

Грузик массой m подвешивается на пружине с жесткостью s . Под действием силы тяжести пружина растягивается, и грузик будет иметь начальное отклонение от равновесия q_0 . Пружина

Таблица 1. Параметры соответствия между механическими колебательными системами и электрическими цепями

Параметры механической системы	Параметры электрической системы
Обобщенная координата q , м	Электрический заряд q , Кл, Асек
Скорость $v = \dot{x}$, м/с	Электрический ток I , А
Масса m , кг	Индуктивность L , Гн
Коэффициент сопротивления (трения), обозначается b или β , кг/с	Омическое сопротивление R , Ом
Коэффициент упругости (жесткости), обозначается s , кг/с ²	Величина, обратная емкости C^{-1} , $\frac{1}{\Phi}$
Возмущающая сила $F(t)$, Н, кгм/с ²	ЭДС $e(t)$ или напряжение $u(t)$, В
Кинетическая энергия $T = \frac{m\dot{q}^2}{2}$, Дж	Электрическая энергия $T = \frac{L\dot{q}^2}{2}$, ВАсек

снабжена демпферным устройством с коэффициентом вязкости сопротивления демфера b . Под действием сил упругости пружина будет стремиться к сжатию и совершать колебания относительно положения равновесия в соответствии с уравнением

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + cq = 0,$$

решение которого

$$q = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \psi), \quad (1)$$

где [2]

$$A = \sqrt{q_0^2 + \frac{(\dot{q}_0 + \delta q_0)^2}{\omega_0^2 - \delta^2}}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{b}{2m}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}},$$

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

$$\psi = \arctg \frac{q_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}{\dot{q}_0 + \delta q_0}, \quad (3)$$

где q_0 – начальное отклонение пружины от положения равновесия, \dot{q}_0 – начальная скорость.

Механической системе, изображенной на рис. 1а, можно поставить в соответствие электрическую схему (рис. 1б), переходный процесс в которой описывается уравнением

$$L \frac{di}{dt} + iR + u_c = 0.$$

Заменяя i на $\frac{dq}{dt}$, u_c на $\frac{q}{C}$, получим

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0, \quad (4)$$

где q – электрический заряд, L, R, C – индуктивность, активное сопротивление и емкость электрической цепи.

Решение однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (4) представим в виде

$$q = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \psi),$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta \pm j\omega_1,$$

$$\text{где } \delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}.$$

Постоянные интегрирования A и ψ найдем из начальных условий:

$$q(0) = -CU = A \sin \psi,$$

$$\left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=0} = \dot{q}(0) = i(0) = \frac{U}{R} =$$

$$= -\delta A \sin \psi + \omega_1 A \cos \psi.$$

$$A = \sqrt{(-CU)^2 + \left[\frac{U}{R} + \delta(-CU) \right]^2},$$

$$\psi = \arctg \frac{(-CU)}{\frac{U}{R} + \delta(-CU)} =$$

$$= \frac{(-CU)\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}{\frac{U}{R} + \delta(-CU)}.$$

Последние выражения в обозначениях, принятых для электрической цепи, имеют вид

$$A = \sqrt{q(0)^2 + \frac{[\dot{q}(0) + \delta q(0)]^2}{\omega_0^2 - \delta^2}},$$

$$\psi = \arctg \frac{q(0)\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}{\dot{q}(0) + \delta q(0)},$$

что абсолютно соответствует выражениям (2) и (3), полученным для механической системы, изображенной на рис. 1а. При этом $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$ соответствует $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; $\delta = \frac{b}{2m}$ соответствует $\delta = \frac{R}{2L}$; $q(0) = -CU$ соответствует значению q_0 , а значение \dot{q}_0 которое в механической системе не было задано, может быть найдено как $\dot{q}(0) = \frac{U}{R} = \frac{(-CU)}{-CR} = -\frac{q(0)}{RC}$ (в электрической цепи), $\dot{q}_0 = -q_0 \frac{c}{b}$ (в механической системе, где R заменено на b , емкость C на жесткость c^{-1}).

Пример 2

В соответствии с рис. 2а машина с неуравновешенным ротором укреплена на фундаменте. Он установлен на пружинах с жесткостью c . Масса машины с фундаментом m . При надлежащем выборе начала отчета времени переменная сила от вращения неуравновешенного ротора может быть записана следующим образом:

$$F(t) = F_0 \sin \omega t,$$

где F_0 и ω – амплитуда и частота вынуждающей силы.

Задача определения амплитуды и частоты вынужденных колебаний, вызванных этой системой, решена, например, в [2]. Колебания описываются уравнением

$$m\ddot{q} + cq = F(t) \quad \ddot{q} + \frac{c}{m} q = \frac{F(t)}{m},$$

$$\ddot{q} + k^2 q = \frac{F_0}{m} \sin \omega t, \quad (5)$$

где $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – собственная частота механической системы, q – обобщенная координата (по вертикали).

Решение уравнения (5) при нулевых начальных условиях и при $\omega \neq k$ имеет вид

$$q = \frac{F_0}{m(k^2 - \omega^2)} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{k} \sin kt \right). \quad (6)$$

Механической системе (рис. 2а) можно поставить в соответствие электрическую схему, изображенную на рис. 2б.

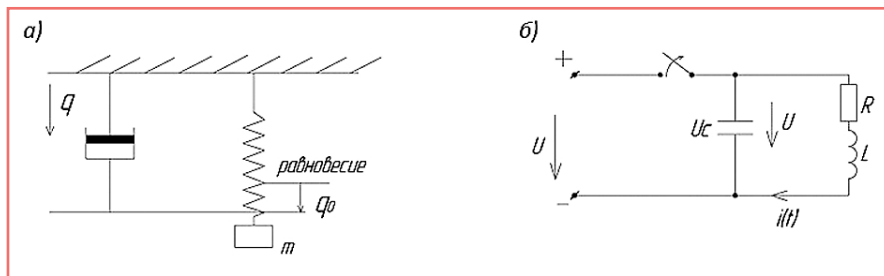


Рис. 1. Пример 1: а) механическая система, б) соответствующая ей электрическая цепь

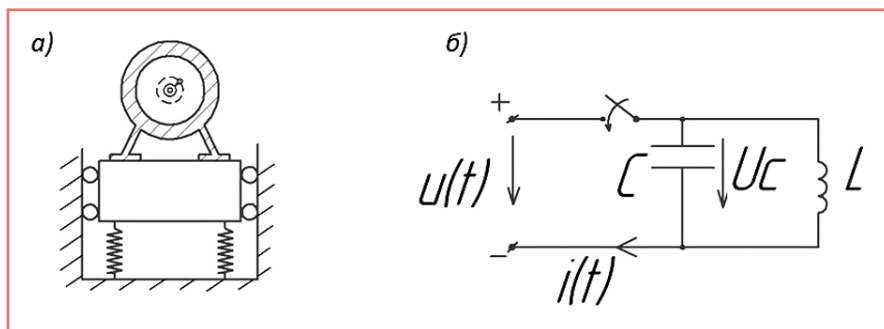


Рис. 2. Пример 2: а) механическая система, б) соответствующая ей электрическая цепь

Уравнение равновесия в схеме после замыкания ключа:

$$L \frac{di}{dt} + u_C = u(t) = U_m \sin \omega t,$$

с учетом того, что $i = \frac{dq}{dt}$, $u_C = \frac{q}{C}$, где q – электрический заряд,

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = \frac{U_m}{L} \sin \omega t. \quad (7)$$

Решение неоднородного уравнения (7) представляется в виде суммы частного решения q' и общего решения однородного уравнения q'' .

Найдем сначала частное решение q' .

Установившееся значение тока в комплексной форме

$$\dot{i}_m = \frac{\dot{U}_m}{Z},$$

где комплексная амплитуда напряжения $\dot{U}_m = U_m e^{j0^\circ}$, комплексное сопротивление $Z = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = j \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}$.

$$\begin{aligned} \dot{i}_m &= \frac{U_m e^{j0^\circ}}{\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C} e^{j90^\circ}} = \\ &= \frac{U_m e^{-j90^\circ} \omega C}{\omega^2 - 1} = \frac{U_m \omega C \omega_0^2 e^{-j90^\circ}}{\omega^2 - \omega_0^2}, \end{aligned}$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота контура L, C .

Значение напряжения на емкости:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mC} &= \dot{i}_m Z_C = \\ &= \frac{U_m \omega C \omega_0^2 e^{-j90^\circ}}{\omega^2 - \omega_0^2} \cdot \frac{1}{\omega C} e^{-j90^\circ} = \\ &= U_m \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2}, \\ q' &= C u_C = \\ &= C U_m \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2} \sin \omega t = \\ &= \frac{U_m}{L} \frac{1}{\omega^2 - \omega_0^2} \sin \omega t, \end{aligned}$$

так как $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$.

Общее решение однородного дифференциального уравнения, полученного из данного неоднородного:

$$q'' = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} = A \sin(\omega_0 t + \psi).$$

Постоянные интегрирования A и ψ найдем из начальных условий:

$$q(0) = 0, \quad \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=0} = 0,$$

$$q(0) = q'(0) + q''(0) \Rightarrow 0 = 0 + A \sin \psi, \quad A \sin \psi = 0,$$

$$\left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{dq'}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{dq''}{dt} \right|_{t=0} \Rightarrow$$

$$0 = \frac{\omega U_m}{L(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t \Big|_{t=0} + \omega_0 A \cos \omega t \Big|_{t=0},$$

$$A \cos \psi = -\frac{\omega}{\omega_0} \frac{U_m}{L(\omega_0^2 - \omega^2)},$$

$$\psi = 0, \quad A = -\frac{\omega}{\omega_0} \frac{U_m}{L(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

$$q = \frac{U_m}{L(\omega_0^2 - \omega^2)} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right).$$

Заменяя в последнем выражении $L \rightarrow m$, $U_m \rightarrow F_0$, $\omega_0^2 \rightarrow k^2$, получим для механической системы выражение

$$q = \frac{F_0}{m(k^2 - \omega^2)} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{k} \sin kt \right),$$

в точности совпадающее с выражением (6).

Пример 3

Вертикальная вынуждающая сила $H \sin \omega t$ (рис. 3а) действует на тело массой m , которое опирается на систему пружин и вязких демпферов, c – коэффициент жесткости системы пружин, b – коэффициент вязкости демпферов. Исследуем вынужденные колебания в системе.

Уравнение, описывающее колебания в системе:

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + cq = H \sin \omega t.$$

Вводя обозначения

$$h = \frac{b}{2m}, \quad k^2 = \frac{c}{a},$$

приходим к уравнению

$$\ddot{q} + 2h\dot{q} + k^2q = \frac{H}{m} \sin \omega t. \quad (8)$$

Уравнение имеет решение [2]:

$$\begin{aligned} q &= \frac{H}{m\sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}} \times \\ &\times \sin(\omega t - \gamma) + e^{-ht} \times \\ &\times (A_1 \sin k_1 t + A_2 \cos k_1 t), \quad (9) \end{aligned}$$

где постоянные A_1 и A_2 определяются из начальных условий. Значения

$$k_1 = \sqrt{k^2 - h^2}, \quad \text{tg } \gamma = \frac{2h\omega}{k^2 - \omega^2}.$$

Механической системе (рис. 3а) соответствует электрическая цепь, схема которой изображена на рис. 3б. Уравнение, описывающее процессы в этой цепи:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = u(t) = U_m \sin \omega t, \quad (10)$$

где q – электрический заряд, L, R, C – индуктивность, активное сопротивление и емкость электрической цепи.

В [3] приводится решение для $u_C(t)$, $q = C u_C$:

$$\begin{aligned} u_C &= -\frac{I_m}{\omega C} (\cos(\omega t + \psi_i)) - \frac{I_m}{\omega C} e^{-\delta t} \\ &\left[\sin \psi_i \sin \omega' t + \frac{\omega_0}{\omega} \cos \psi_i \sin(\omega' t - \theta) \right], \end{aligned}$$

где I_m – амплитуда тока в установившемся режиме, $\psi_i = \psi_u - \varphi = -\varphi$ – начальная фаза тока, φ – угол сдвига фаз, $\delta = \frac{R}{2L}$, $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ – частота собственных колебаний контура, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота контура.

Амплитуда тока в установившемся режиме:

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \\ &= \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}\right)^2}} = \\ &= \frac{U_m \omega C}{\sqrt{(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}, \\ q_m &= C U_m = C I_m \left(\frac{1}{\omega C}\right) = \\ &= \frac{C U_m}{\sqrt{(R\omega C)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right)^2}} = \\ &= \frac{C U_m \omega_0^2}{\sqrt{(R\omega \omega_0^2 C)^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2}}. \end{aligned}$$

Так как

$$C \omega_0^2 = \frac{C}{LC} = \frac{1}{L},$$

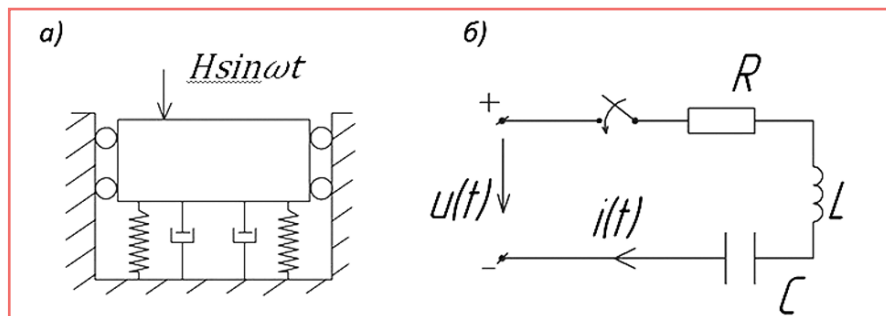


Рис. 3. Пример 3: а) механическая система, б) соответствующая ей электрическая цепь

$$(R\omega C)^2 = \frac{R^2 C^2}{L^2 C^2} = \left(\frac{R}{L}\right)^2 = 4\left(\frac{R}{2L}\right)^2 = 4\delta^2,$$

$$q_m = \frac{U_m}{L\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}}, \quad (11)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega CR} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{R\frac{\omega C}{LC}},$$

$$\varphi = \arctg\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\delta\omega},$$

$$\psi_i = \psi_u - \varphi = -\varphi = \arctg\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\delta\omega},$$

$$\psi_{uc} = \psi_i - 90^\circ = -\arctg\frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (12)$$

Окончательно принужденная составляющая заряда:

$$q'_m = \frac{U_m}{L\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}} \sin(\omega t + \psi_{uc}). \quad (13)$$

Заменяя $U_m \rightarrow H$, $L \rightarrow m$, $\omega_0^2 \rightarrow k^2$, $\delta \rightarrow h$, $\psi_{uc} \rightarrow \gamma$, получим, что выражение (13) преобразуется в (9).

Пример 4

Определим вынужденные колебания в механической системе, изображенной на рис. За, если вынуждающая сила импульсная $H = H_0 e^{-\beta t}$.

Соответствующая ей электрическая схема изображена на рис. 3б. Процессы, происходящие в механической системе, описываются уравнением

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + cq = H_0 e^{-\beta t},$$

где q – обобщенная координата (здесь вертикальная).

Уравнение равновесия в соответствующей электрической схеме:

$$L\frac{d^2 q}{dt^2} + R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = u(t) = U_0 e^{-\beta t}$$

$$\text{или } \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = u(t) = \frac{U_0}{L} e^{-\beta t}, \quad (14)$$

где q – электрический заряд, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота контура.

Решение неоднородного уравнения (14) представляется в виде $q = q' + q''$, где q' – частное решение данного неоднородного уравнения, q'' – решение однородного уравнения, полученного из данного.

Решение q' представляется в виде $q' = Ae^{-\beta t}$. Постоянная A определяется путем подстановки значения q' в уравнение (14):

$$\beta^2 A e^{-\beta t} + (-\beta) A e^{-\beta t} \frac{R}{L} + \omega_0^2 A e^{-\beta t} = \frac{U_0}{L} e^{-\beta t},$$

$$A = \frac{U_0}{L\left(\beta^2 - \beta\frac{R}{L} + \omega_0^2\right)},$$

$$q' = \frac{U_0}{L\left(\beta^2 - \beta\frac{R}{L} + \omega_0^2\right)} e^{-\beta t}.$$

Решение q'' представляется в виде

$$q'' = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t},$$

где $\alpha_{1,2}$ – корни характеристического уравнения, составленного по (14),

$$\alpha^2 + \frac{R}{L}\alpha + \omega_0^2 = 0,$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \omega_0^2} =$$

$$= -\frac{R}{2L} \pm j\omega',$$

где

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{R^2}{4L^2}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

$$q'' = B e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \psi).$$

Постоянные интегрирования, найденные из начальных условий

$$q(0) = 0, \quad \left.\frac{dq}{dt}\right|_{t=0} = 0, \text{ равны}$$

$$B = \frac{U_0}{L\left(\beta^2 - \beta\frac{R}{L} + \omega_0^2\right)} \sqrt{1 + \frac{(\beta - \delta)^2}{\omega'^2}},$$

$$\varphi = \arctg\frac{\omega'}{\delta - \beta}.$$

Окончательно имеем, заменив

$$L \rightarrow m, R \rightarrow b, \frac{1}{C} \rightarrow c, U_0 \rightarrow H_0,$$

$$q = \frac{H_0}{m\left(\beta^2 - \beta\frac{b}{m} + \frac{c}{m}\right)} \times \left[e^{-\beta t} + \sqrt{1 + \frac{(\beta - \delta)^2}{\omega'^2}} e^{-\frac{b}{m} t} \sin(\omega' t + \psi) \right]. \quad (15)$$

Последнее выражение может быть использовано при анализе вынужденных колебаний механической системы от воздействия ударных сил. Если F – ударная сила, τ – длительность или время удара, то характерный график изменения ударной силы за время удара может быть изображен согласно рис. 4а. Во многих случаях не требуется знания закона изменения ударной силы [4], достаточно только знать ударный импульс

$S = \int_0^t F dt$. Иногда рассматривают среднюю ударную силу, постоянную в течение удара, которая за то же время дает такой же импульс, как и переменная. Средняя ударная сила при этом определяется из соотношения $F_{cp} t_0 = S$.

Таким образом, ударная сила на рис. 4а может быть изображена прямоугольной силой F_{cp} длительностью t_0 или экспонентой $F = F_m e^{-\beta t}$, имеющей ту же величину ударного импульса S .

На основании теоремы Рэлея (или равенства Парсевалья) два импульса эквивалентны по энергетическому воздействию, если в основной полосе частот они имеют одинаковые амплитудные спектры. Можно показать, что спектры двух импульсов совпадают в основной полосе частот, если сумма несопадающих площадей этих импульсов минимальна. Исходя из этого условия в [5] найдены параметры экспоненциального импульса, эквивалентного прямоугольному $U_m = 1,67 U_0$, $t_u = 1,82 t_0$ (рис. 4б).

Экспоненциальная форма импульса в математическом смысле имеет преимущества в сравнении с другими формами, так как при дифференцировании и интегрировании экспонента сохраняется (как и синус).

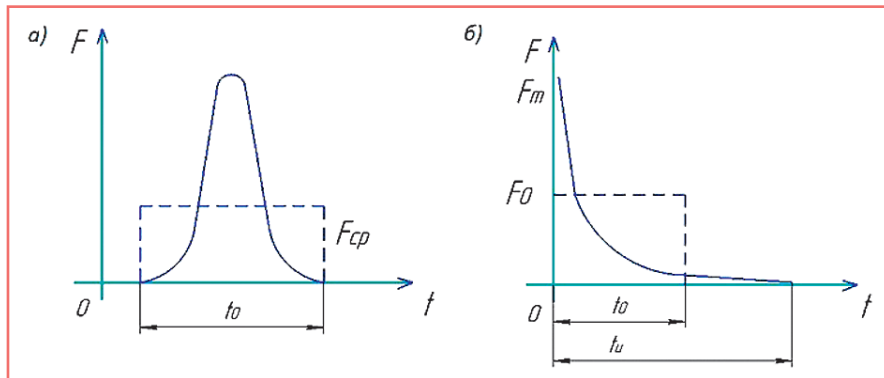


Рис. 4. Пример 4:
а) замена реальной ударной силы эквивалентной прямоугольной,
б) замена прямоугольного импульса эквивалентным экспоненциальным

Выводы

В статье показано, что на основе аналогии между механическими системами и электрическими цепями можно сравнительно легко получить решение для вынужденных колебаний в механических системах при разных формах воздействий, как непрерывных, так и импульсных.

Литература

1. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. 2 Динамика. – М.: Наука, 1991. – 639 с.
2. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1980. – 272 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. – М., СПб.: Питер, 2009. – 512 с.
4. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1990. – 607 с.
5. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

Горский Анатолий Николаевич

Родился в 1938 году. В 1960 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Инженер путей сообщений – электромеханик». Доктор технических наук, профессор. В 1995 году защитил диссертацию по теме «Методы расчета реакторно-трансформаторного оборудования преобразовательных устройств при минимизации массы и габаритов». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВО ПГУПС. Имеет 112 печатных трудов, в том числе 3 учебных пособия и 4 книги.

Чернышева Юлия Владимировна

Родилась в 1982 году. В 2004 году окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт». В настоящее время работает инженером кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС и старшим преподавателем кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПГУПС и является соискателем ученой степени. Имеет 11 научных трудов.

Gorskiy Anatoly

He was born in 1938. In 1960 he graduated from Leningrad Railway Engineering Transport Institute majoring in «Engineer of Railway transport – Electrician». He is doctor of technical sciences, professor. In 1995 he defended the thesis, the thesis topic is «Calculating methods of reactor and transformer equipment of conversion devices during minimizing weight and dimensions». He has 50 years of work experience. At present, he works as associate professor of «Electromechanical complexes and systems department of Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Transport». He has 112 published papers, including 3 study guide and 4 books.

Chernysheva Julia

Was born in 1982. In 2004 she graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in «Electric transport». At present she works as engineer of «Electric traction» department of St. Petersburg State Transport University / senior teacher of «Wagons and rolling stock» department of St. Petersburg State Transport University and she is candidate for a degree. She has 11 scientific works.

Трехмерная модель распределения температуры по коллектору двигателя пульсирующего тока

// Three-dimensional model of distribution of temperature on a collector of the engine of the pulsing current //

Ларченко А.В., к. т. н., доцент,
Чуйко А.Д.,
ЗаБИЖТ ИргУПС, г. Чита

В статье рассмотрены вопросы совершенствования диагностирования таких неисправностей, как выплавление припоя из петушка коллектора. Предложены модели изучения распределения плотности тока и температурного поля в коллекторных пластинах, которые позволяют понять физические процессы появления таких видов дефектов. Ключевые слова: коллектор, плотность тока, нагрев, тяговый электродвигатель.

Тяговые электродвигатели выходят из строя из-за проявления различных неисправностей и дефектов, которые можно обнаружить с использованием различных методик [1]. Согласно статистическим данным по отказам ТЭД одним из наиболее часто встречающихся повреждений является выплавление припоя из петушков коллектора [2].

При некачественной пайке происходят увеличение переходного сопротивления в месте соединения

In article the questions connected with improvement of diagnosing of such malfunctions as smelting of solder from «commutator riser» of a collector are considered. Models of studying of distribution of density of current and the temperature field in collector plates which allow to understand physical processes of emergence of such types of defects are offered. Keywords: collector, current density, heating, traction electric motor.

коллекторной пластины и обмотки якоря и, как следствие, значительный нагрев, описываемый законом Джоуля – Ленца [3]:

$$Q = I^2 R dt, \quad (1)$$

где Q – количество теплоты, мера энергии тела, Дж; I – сила тока в проводнике, А; R – переходное сопротивление, характеризующее плохой контакт, Ом; dt – промежуток времени, в течение которого происходит нагрев, с.

Согласно формуле (1) количество теплоты в пластине прямо пропорционально квадрату тока и произведению на сопротивление R . Если в пластине имеется плохой контакт, справедливо следующее неравенство:

$$\begin{cases} Q_1 < Q_2 > Q_3 \\ T_1 < T_2 > T_3 \end{cases} \text{ при } t \neq 0 \quad (2)$$

Введем декартову систему координат Oxy , выбрав начало координат, и направим оси x и y так, как показано на рис. 1.

Задача теплопроводности в двухмерной пластине запишется в виде формул (3), (4) и (5):

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (3)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} \right) = \alpha_i (T(x, y) - T_f) \Big|_{S_{\alpha_i}}, \quad i = 3, 4, 5 \quad (4)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} \right) = q_i, \quad i = 0, 1, 2, \quad (5)$$

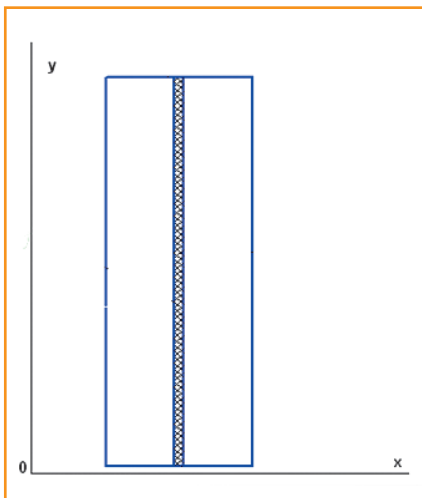


Рис. 1. Коллекторные пластины в декартовой системе координат Oxy

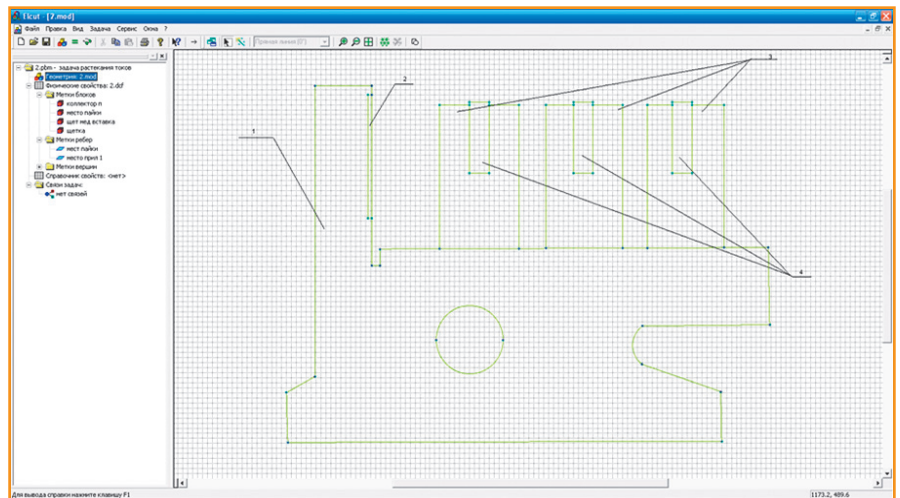


Рис. 2. Геометрия модели коллекторной пластины ТЭД НБ-418 К6 в программной среде Elcut: 1 – коллекторная пластина, 2 – место пайки в петушках коллектора электродвигателя, 3 – щетки двигателя, 4 – медные вставки (токопровод)

где I_x, I_y – направляющие косинусы вектора внешней нормали к граничной поверхности; S_{ci} – граничная поверхность, на которой происходит теплообмен с коэффициентом теплообмена α_i ; S_{qi} – граничная поверхность, на которой

задан тепловой поток плотности q_i ; λ – коэффициент теплопроводности.

Тепловая модель коллектора электродвигателя должна быть связана с моделью распределения плотности тока в коллекторной пластине. Поэтому

с целью обнаружения наиболее нагреваемого места в коллекторе необходимо провести анализ распределения плотности тока в пластине электрической машины.

При построении модели по распределению плотности тока в коллекторной пластине ТЭД НБ-418 К6 было необходимо обнаружить наиболее нагреваемое место в коллекторе для получения более достоверной диагностической информации при выявлении такого типа дефекта, как некачественная пайка в петушках коллектора электродвигателя. В ходе моделирования получена модель, представленная на рис. 2.

Результаты моделирования распределения плотности тока в коллекторной пластине (при хорошей пайке) представлены на рис. 3.

При расчете методом конечных элементов распределения плотности тока в пластине получены результаты (при плохой пайке), проиллюстрированные рис. 4–5.

Трехмерная модель двигателя нестационарного процесса позволяет более точно воспроизвести нагрев с дефектом некачественной пайки и с учетом двух условных зон, где распределение тока больше и нагрев, следовательно, выше.

В соответствии с правилами ремонта электрических двигателей техническое состояние паяного соединения считается удовлетворительным при степени пропайки контактного соединения не менее 80% [4]. Для данного контактного соединения в программе Elcut расчетным путем установлено критическое значение температурного перепада, которое составляет 20 °С и является браковочным при оценке технического состояния якоря [5].

Таким образом, предложенные модели изучения распределения плотности тока и температурного поля в коллекторных пластинах позволяют понять физические процессы появления таких видов дефектов, как выплавление припоя из петушков коллектора, и совершенствовать способы их диагностирования.

Литература

1. Глуценко М.Д., Ларченко А.В., Чуйко А.Д., Христенков С.А. Система тестового диагностирования, реализующая оценку технического состояния электрической машины с использованием процесса пуска на холостом

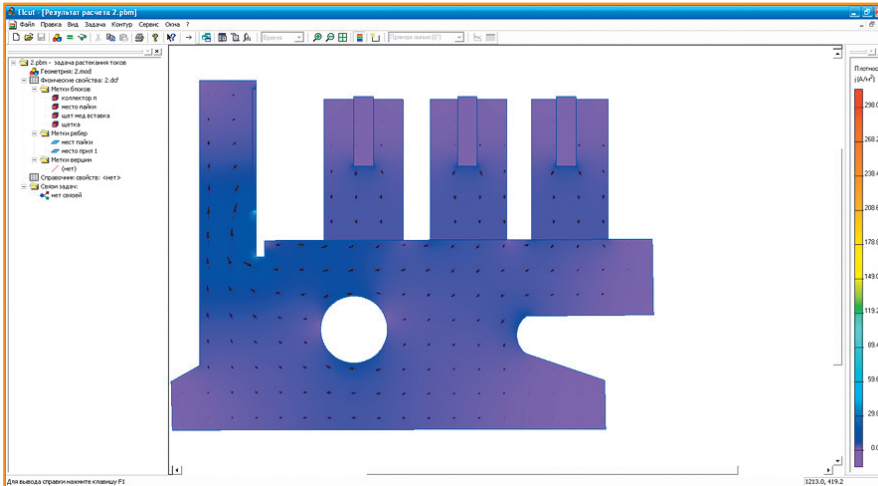


Рис. 3. Распределение плотности тока в коллекторной пластине ТЭД НБ-418 К6

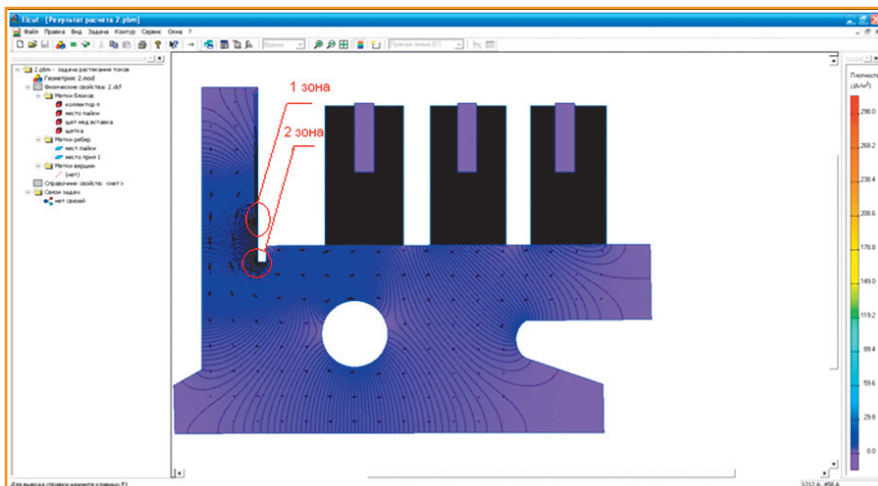


Рис. 4. Распределение плотности тока в зонах 1 и 2 (при плохой пайке обмотки к петушкам коллектора)

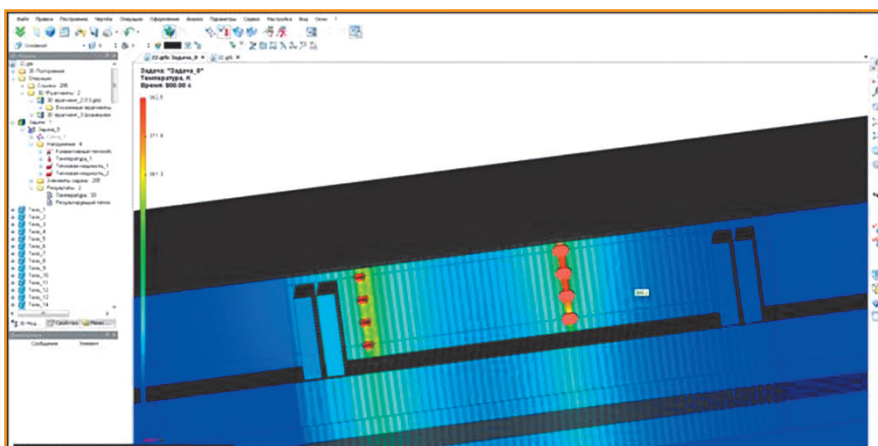


Рис. 5. Распределение температурного поля коллектора в программной среде Teflex для одного полюсного деления

ходу // Электроника и электрооборудование транспорта, 2015. № 2. – С. 38–41.

2. Чуйко А.Д. Анализ существующих методов диагностирования паянных соединений петушков коллектора тягового электродвигателя // Управление, эксплуатация и ремонт железнодорожных узлов и агрегатов. Межвузовский сборник научных трудов. – Чита: ЗаБИЖТ, 2009.

3. Фоменко В.К. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния якорей тяговых электродвигателей локомотивов: диссертация кандидата технических наук: 05.22.07. – Омск, 2008. – 143 с.

4. ЦТ-ЦТВР-4782. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава.

5. Чуйко А.Д. Расчет теплового поля коллектора в программной среде Elcut 5.6 // Инновации и современные технологии – экономике и транспорту. Межвузовский сборник научных трудов. – Чита: ЗаБИЖТ, 2013.

Ларченко Алексей Владимирович

Родился в 1981 году. В 2003 году окончил Дальневосточный государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт (железнодорожный транспорт)». Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Методы идентификации дефектов щеточно-коллекторного узла и магнитной системы электрических машин». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает деканом факультета «Наземные транспортные системы» ЗаБИЖТ ИргУПС. Имеет 28 статей, 2 патента.

Чуйко Алексей Дмитриевич

Родился в 1986 году. В 2008 году окончил Иркутский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Подвижной состав железных дорог» ЗаБИЖТ ИргУПС. Имеет 5 статей.

Larchenko Alexey

Was born in 1981. In 2003 he graduated from Far Eastern State Transport University majoring in «Electric transport (railways)». He is Candidate of Technical Sciences, associate professor. In 2011 he defended the dissertation with topic «Methods for identifying defects of the brush-collector unit and the magnetic system of electrical machines». He has 13 years of work experience. At present he works as Dean of В настоящее время работает деканом факультета «Land transport systems» of Transbaikal Railway Transportation Institute. He has 28 articles. 2 patents.

Chuiiko Alexey

Was born in 1986. In 2008 he graduated from Irkutsk State Railway Transportation University majoring in «Electrical railway». He has 8 years of work experience. At present he works as Head teacher of Transbaikal Railway Transportation Institute В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Railway rolling stock» of Transbaikal Railway Transportation Institute. He has 5 articles.

Разработка метода проектирования линейных электрических машин возвратно-поступательного действия на основе топологической оптимизации

// Development of the method of designing linear electric machines of return-passable action on the basis of topological optimization //

Сафин А.Р., к. т. н., доцент, Хуснутдинов Р.Р., к.ф.-м.н., доцент, Копылов А.М., Максимов В.В., к. т. н., доцент, Цветков А.Н., к. т. н., доцент, Гибадуллин Р.Р., Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

В статье предлагается современный метод топологической оптимизации распределения материалов в линейных электрических машинах с использованием генетического алгоритма в сочетании с группировкой по материалу и процедурой очистки. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия находят широкое применение в станкостроении, авиастроении, нефтяной промышленности, космической и оборонной отраслях, электроэнергетике в составе автономных энергетических установок, в волновых генераторах, а также в гибридных автомобилях. Предполагалось, что транслятор с постоянными магнитами имеет несложную конструкцию для простоты изготовления. Спроектирована и изготовлена структура транслятора с постоянными магнитами. Изготовленный транслятор имеет увеличенную на 24% среднюю электромагнитную силу по сравнению с аналогичными машинами с таким же статором, что доказывает эффективность данного метода.

Ключевые слова: линейная электрическая машина возвратно-поступательного действия, генетические алгоритмы, топологическая оптимизация, метод конечных элементов.

Существуют несколько методов проектирования для оптимизации электрических машин и электромагнитных устройств. Однако большинство этих методов ограничено оптимизацией нескольких параметров, определяющих форму. В этой связи перспективным для достижения оптимального проекта должно стать проектирование топологии структуры электрической машины в заданном пространстве. Топологическая оптимизация позволяет получить

The paper proposes a modern method for topological optimization of material distribution in linear electric machines using a genetic algorithm in combination with grouping by material and the «cleaning» procedure. Linear electric reciprocating machines are widely used in machine-tool construction, aircraft building, oil industry, space and defense industries, electric power plants, in wave generators, as well as in hybrid cars. It was assumed that the permanent magnet translator has a simple design for ease of manufacture. The structure of the translator with permanent magnets is designed and manufactured. The manufactured translator has an increased by 24% average electromagnetic force compared to similar machines with the same stator, which proves the effectiveness of this method.

Keywords: linear electric machine of reciprocating action, genetic algorithms, topological optimization, finite element method.

первоначальную концептуальную структуру, владея минимальной информацией о структуре объекта. Методы топологической оптимизации предложены около 20 лет назад и оказались очень перспективными [1, 2]. Например, в работе [3] предложена топологическая оптимизация с использованием метода чувствительности. В статье [4] предложен метод ON/OFF чувствительности в сочетании с генетическими алгоритмами для улучшения характеристики

сходимости (конвергенции). В работе [5] спроектирована электромагнитная система методом топологической оптимизации с учетом направления намагничивания. В работе [6] предложили данный метод оптимизации для проектирования магнитотермических систем. В работе [7] разработана 3D – электромагнитная машина с магнитно-мягким композитным сердечником. В работе [8] предложен метод топологической оптимизации, использующий генетические алгоритмы (ГА) и ON/OFF чувствительность в сочетании с методом «размытия», чтобы избежать мелких пятен структуры. В [9] учтена функция отображения для улучшения выпуклости в процедуре топологической оптимизации. В работе [10] применен метод топологической оптимизации к магнитной структуре. В работе [11] спроектирован двигатель (с ротором на постоянных магнитах) с использованием метода ON/OFF. В работе [12] произведена оптимизация магнитных приводов методом функции уровня. В работе [13] оптимизирован индуктор с помощью эволюционного алгоритма. В работе [14] предложен трехмерный метод топологической оптимизации, основанный на многоступенчатом использовании ГА. В работе [15] представлено возможное решение проблемы структурной оптимизации с использованием алгоритма простого эвристического поиска.

Авторами предложен метод топологической оптимизации для оптимизации распределения материалов в линейной электрической машине с использованием ГА. Кроме того, предложена концепция кластеризации материалов и процедуры очистки материалов. В предыдущих исследованиях рассматривались только два типа материалов (воздух и сталь), и следовательно, метод похож на метод ON/OFF. Предыдущий метод был улучшен, чтобы рассмотреть использование более двух материалов,

а именно воздуха, стали, а также R-, X-ориентированных магнитов (радиальная и аксиальные намагниченности). Кроме того, изначально предполагалось, что структура полученного транслятора будет состоять из постоянных магнитов простой формы, чтобы снизить затраты на производство.

Метод топологической оптимизации

ГА – это алгоритм, который имитирует эволюцию живых существ и подходит для задач с большим объемом выборки. В предлагаемом способе область проектирования разделяется на сеть ячеек конечных элементов, а материалы разделяются на несколько элементов, например, так, как связаны гены в хромосоме. Если мы рассмотрим три типа материалов (воздух, сталь и магнит), которые обозначены 0, 1 и 2, то по аналогии хромосома состоит из некоторых генов, как показано на рис. 1. Два родителя выбираются случайным образом, и некоторые гены выбираются для обмена посредством однородного кроссовера (в биологии кроссинговер – молекула, возникшая в результате обмена генами), в результате создаются два новых ребенка, как показано на рис. 1. Дети наследуют лучшие характеристики родителей, затем процесс повторяется.

Предложена концепция кластеров, зон с однородными свойствами, для различных типов материалов. Например, сталь 2 и сталь 3 являются элементами одного кластера, так как соседствуют друг с другом, а сталь 4 является элементом другого кластера (рис. 2а). Если область, занимаемая кластером, узкая, то есть количество ячеек в одном кластере меньше или равно целому числу



Рис. 1. Пример построения хромосом и процесса кроссовера

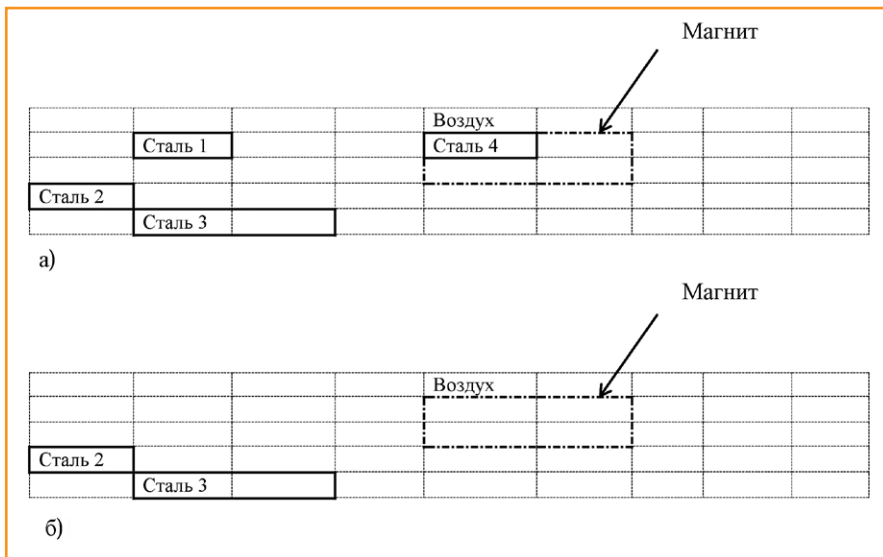


Рис. 2. Концепция кластеров и процедуры очистки: а) перед очисткой; б) после очистки

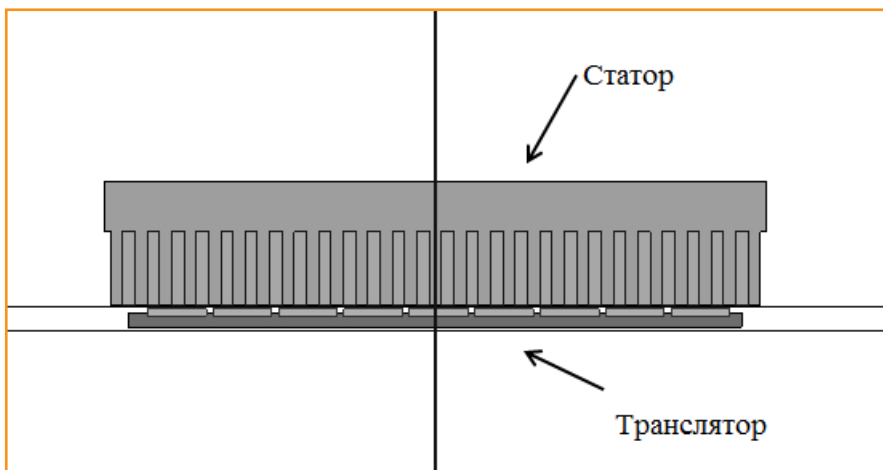


Рис. 3. Поперечное сечение линейной электрической машины

N_{min} , то запускается процедура очистки. Например, когда $N_{min} = 2$, то сталь 2 и сталь 3 остаются, а сталь 1 заменяется на окружающий воздух, сталь 4 заменяется на магнит (рис. 2б). В результате такого способа удаляются «плавающие» элементы материала.

На рис. 3 показано поперечное сечение линейной электрической машины возвратно-поступательного действия с транслятором и статором. Исследование по топологической оптимизации повторяется с новой увеличенной длиной генов. Для первой итерации грубая топология разработана с использованием небольшого количества конструктивных переменных в массиве размеров 5×9 (рис. 2).

Два направления намагниченности постоянного магнита показаны на рис. 4.

Линейные генераторы на постоянных магнитах могут иметь систему возбуждения, выполненную с радиально намагниченными постоянными

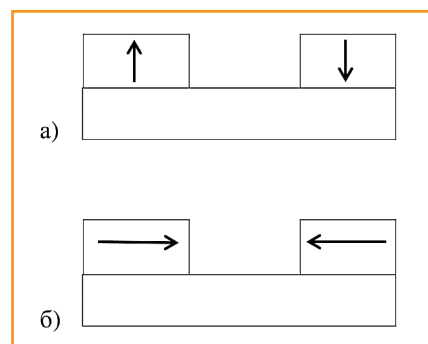


Рис. 4. Направления намагниченности в постоянном магните: а) радиальная намагниченность; б) аксиальная намагниченность

магнитами (рис. 4а) и аксиально намагниченными постоянными магнитами (рис. 4б).

На рис. 5 показана обработка кластера материала на границе. X- и R-ориентированные магниты имеют противоположные направления

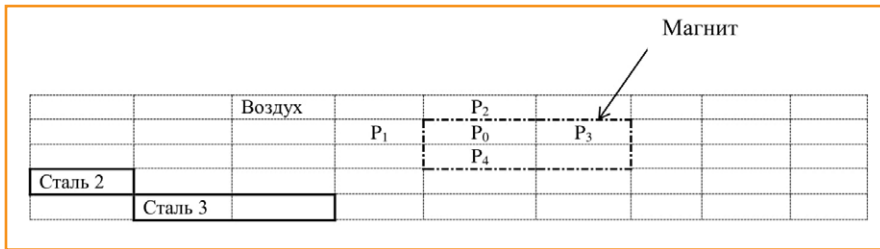


Рис. 5. Кластер материалов на второй итерации

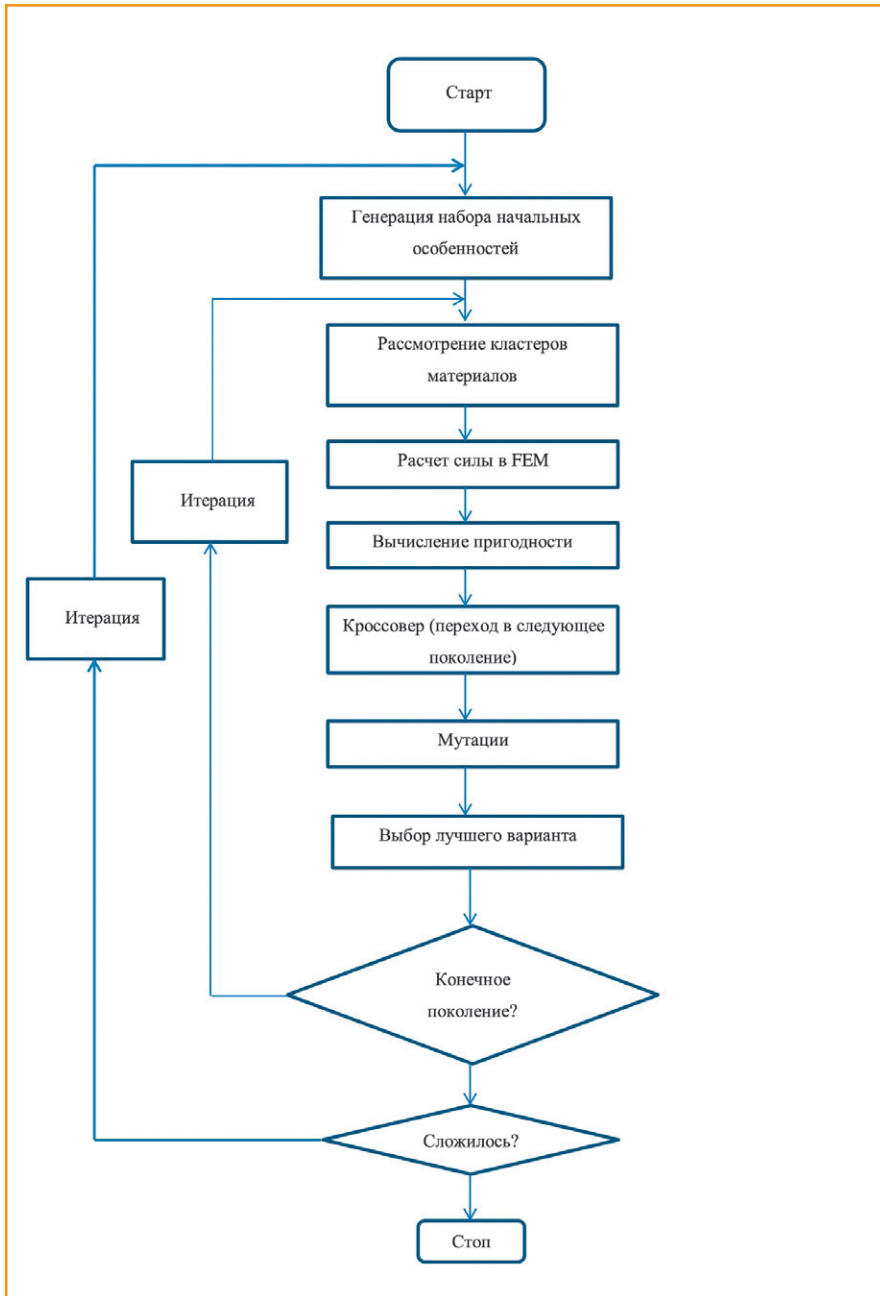


Рис. 6. Блок-схема топологической оптимизации

намагниченности с обеих сторон периодической границы, поэтому количество ячеек в кластере «Воздух, сталь и магнит» удваивается. С другой стороны, количество ячеек в кластере «Воздух, сталь и R-ориентированный магнит» удваивается по обе стороны

от симметричной границы, потому что R-ориентированный магнит имеет такое же направление намагниченности.

Затем разрабатывается более точная топология с использованием большого количества переменных проектирования для второй итерации в массиве

ячеек 20 × 18. Для второй итерации набор исходных генов в ГА наследует особь, которая имеет лучшую приспособленность после завершения предыдущей итерации. Например, исходный материал в ячейке P₀ генерируется с вероятностью 1/5 из материалов в ячейках P₀, P₁, P₂, P₃ и P₄, показанных на рис. 5. Вся блок-схема предложенного метода представлена на рис. 6.

Структура транслятора, полученная с помощью топологической оптимизации

Оптимизируется топология структуры транслятора, рассматриваются два типа постоянных магнитов (ПМ): R-ориентированный и X-ориентированный магниты. Количество поколений (популяций) установлено равным 45. Есть возможность получить лучший результат, если выбрано число больше 45. Однако это приведет к более длительному времени вычисления. На рис. 7 показана характеристика сходимости топологической оптимизации. Мы находим, что функции пригодности почти сходятся на каждой итерации, а именно на каждом 300-м поколении.

На рис. 8а показана полученная структура транслятора, состоящая из трех материалов: воздуха, железа и R-ориентированного магнита. Число N_{min} на первой итерации равно 1. Это означает, что если в кластере количество ячеек меньше 2, то материал кластера меняется на материал окружающих клеток. На второй итерации N_{min} выбирается равным 4. Оптимизация, в которой учитываются только R-ориентированные магниты, создает ротор постоянного магнита. На рис. 8б показан транслятор, учитывающий X-ориентированные магниты.

На рис. 8в показана полученная структура ротора, когда кластеризация материала (группировка по сходным свойствам) и процедура очистки не выполнялись. Хотя полученная форма магнита похожа на форму, показанную на рис. 8а, 8б, ротор имеет множество мелких частиц воздуха в R-ориентированном магните. Как упоминалось выше, процедура очистки может удалить небольшой кластер материалов. Поэтому структура, полученная без учета процедуры очистки, содержит множество мелких кусков железа в магните и многочисленные воздушные полости в железе, которые показаны на

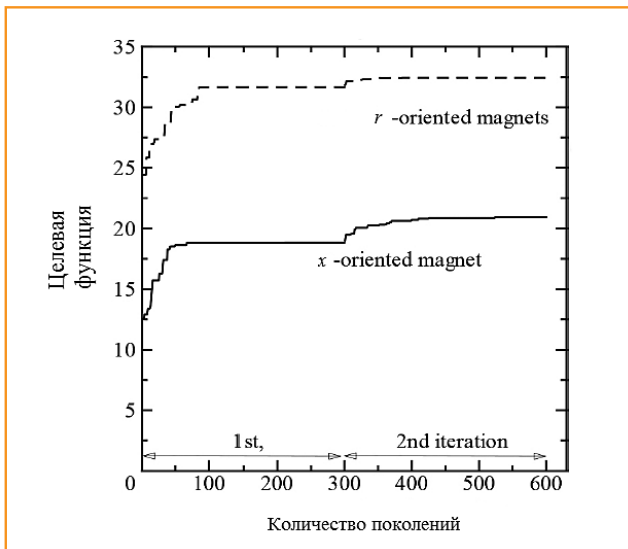


Рис. 7. Сходимость топологической оптимизации

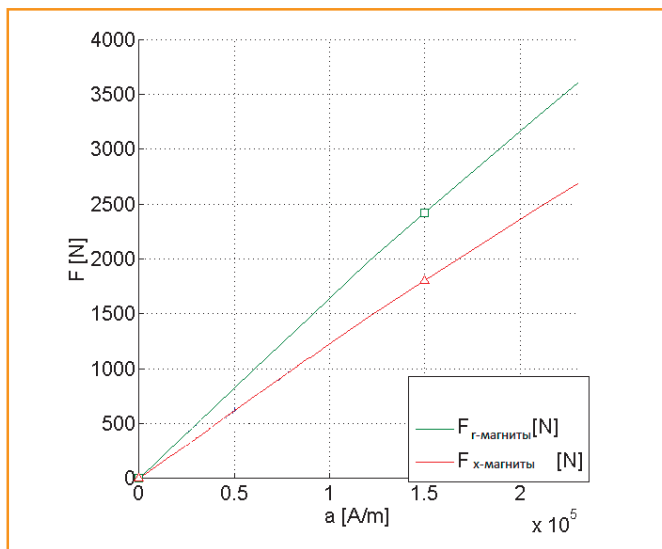


Рис. 9. Характеристики трансляторов с радиальной и аксиальной намагниченностью

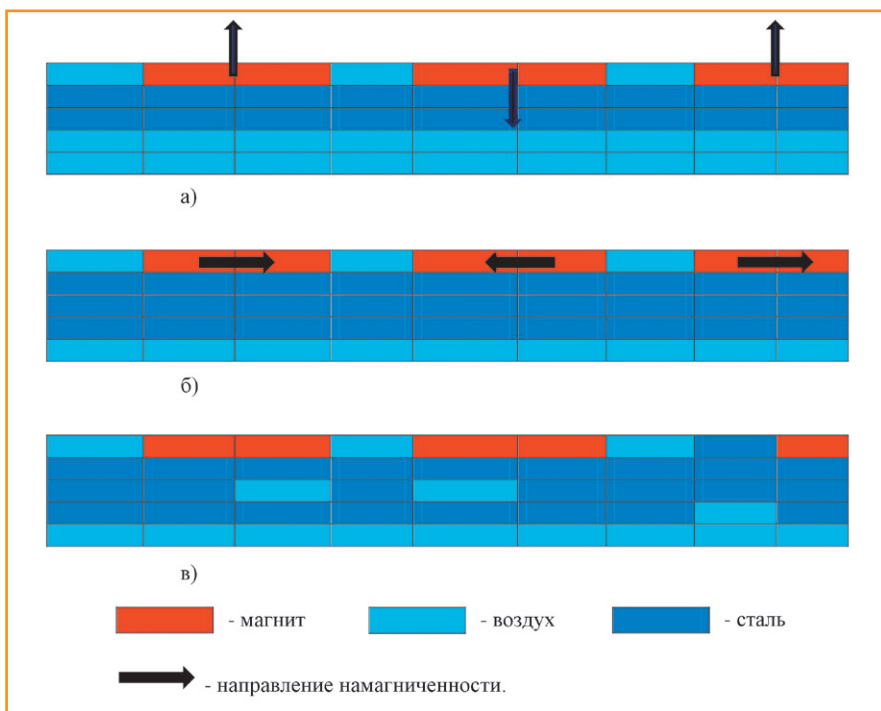


Рис. 8. Структуры транслятора при топологической оптимизации: а) структура транслятора с радиальной намагниченностью; б) структура транслятора с аксиальной намагниченностью; в) без процедуры очистки

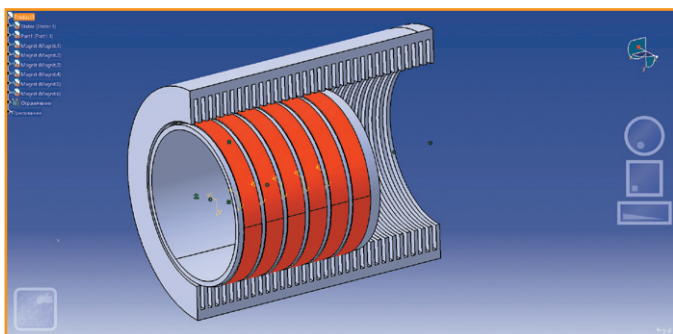


Рис. 10. 3D-модель линейной электрической машины



Рис. 11. Экспериментальный образец

рис. 8в. Такой транслятор имеет сложную слабую структуру, и его трудно изготовить.

Расчет силы намагничивания

На основе рассчитанных конструктивных параметров получены значения намагничивающих сил $F(x)$ для радиальной и аксиальной намагниченности в зависимости от линейной токовой нагрузки, которые представлены на рис. 9.

При токовой нагрузке $1,5 \cdot 10^5$ А/м транслятор с радиальной намагниченностью обеспечивает 2490 Н, с аксиальной намагниченностью – 1900 Н [23].

Общий вид разработанной линейной электрической машины представлен на рис. 10 [21, 22].

На основе проведенных проектных расчетов разработана конструкторская документация и изготовлен экспериментальный образец линейной электрической машины (рис. 11) [20, 24].

Учитывая вышеизложенное, приходим к выводу, что наиболее рациональной формой реализации линейной электрической машины возвратно-поступательного действия является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном якоре. Конструктивно целесообразно выполнять якорь полым, с поверхностью монтируемыми магнитами, формирующими радиальный магнитный поток. Выбранная форма реализации обеспечит наилучшие технико-экономические характеристики линейной электрической машины возвратно-поступательного действия.

Выводы

В данном исследовании разработана структура транслятора линейной электрической машины с постоянными магнитами. Предлагаемый процесс оптимизации объединяет топологический метод оптимизации и метод, учитывающий экономичность изготовления. Полученный транслятор линейной электрической машины имеет на 24% больше электромагнитной силы, чем двигатель с тем же статором с аксиальной намагниченностью. Поэтому эффективность предлагаемого метода подтверждается.

Публикация статьи осуществлена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 17-48-160438.

Литература

1. Zhu Z.Q., Howe D. and Xia Z.P. Prediction of open-circuit air gap field distribution in brushless machines having an inset permanent magnet rotor topology, *IEEE Trans. Magn.*, 1994, vol. 30, no. 1, p. 98–107.
2. Dyck D.N. and Lowther D.A. Automated design of magnetic devices by optimizing material distribution, *IEEE Trans. Magn.*, 1996, vol. 32, no. 3, p. 1188–1193.
3. Byun J.K., Hahn S.Y. and Park I.H. Topology optimization of electrical devices using mutual energy and sensitivity, *IEEE Trans. Magn.*, 1999, vol. 35, no. 5, p. 3718–3720.
4. Im C.H., Jun H.K. and Kim Y.J. Hybrid genetic algorithm for electromagnetic topology optimization, *IEEE Trans. Magn.*, 2003, vol. 39, no. 5, p. 2163–2169.
5. Wang S., Youn D., Moon H. and Kang J. Topology optimization of electromagnetic systems considering magnetization direction, *IEEE Trans. Magn.*, 2005, vol. 41, no. 5, p. 1808–1811.

6. Shim H., Wang S. and Hameyer K. Topology optimization of magneto thermal systems considering eddy current as Joule heat, *IEEE Trans. Magn.*, 2007, vol. 43, no. 4, p. 1617–1620.
7. Kim D.H., Sykulski J.K. and Lowther D.A. The implications of the use of composite material in electromagnetic device topology and shape optimization, *IEEE Trans. Magn.*, 2009, vol. 45, no. 3, p. 1154–1157.
8. Choi J.S. and Yoo J. Structural topology optimization of magnetic actuators using Genetic algorithms and ON/OFF sensitivity, *IEEE Trans. Magn.*, 2009, vol. 45, no. 5, p. 2276–2279.
9. Labbe T. and Dehez B. Convexity-oriented mapping method for the topology optimization of electromagnetic devices composed of iron and coils, *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, no. 5, p. 1177–1185.
10. Lee J. and Kikuchi N. Structural topology optimization of electrical machinery to maximize stiffness with body force distribution, *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, no. 10, p. 3790–3794.
11. Takahashi N., Yamada T. and Miyagi D. Examination of optimal design of IPM motor using ON/OFF method, *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, no. 8, p. 3149–3152.
12. Park S. and Min S. Design of magnetic actuator with nonlinear ferromagnetic material using level-set based topology optimization, *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, no. 2, p. 618–621.
13. Watanabe K., Campelo F., Iijima Y., Kawano K., Matsuo T., Mifune T. and Igarashi H. Optimization of inductors using evolutionary algorithms and its experimental validation, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 8, p. 3393–3396, (2010) 278 Optimization Algorithms- Methods and Applications.
14. Okamoto Y., Tominaga Y., Sato S. Topological design for 3-D optimization using the combination of multistep genetic algorithm with design space reduction and nonconforming mesh connection, *IEEE Trans. Magn.*, 2012, vol. 48, no. 2, p. 515–518.
15. Hahn I. Heuristic structural optimization of the permanent magnets used in a surface mounted permanent-magnet synchronous machine, *IEEE Trans. Magn.*, 2012, vol. 48, no. 1, p. 118–127.
16. Ishikawa T., Kaneda M. and Yamagiwa A. Optimal material distribution design of interior permanent magnet synchronous motor using Genetic algorithm, The 10th biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Perugia, Italy, 2002, p. 2–4.
17. Ishikawa T., Yonetake K. and Kurita N. An optimal material distribution design of brushless DC motor by genetic algorithm considering a cluster of material, *IEEE Trans. Magn.*, 2011, vol. 47, no. 5, p. 1310–1313.
18. Ishikawa T. and Nakayama K. Topology optimization of rotor structure in brushless DC mo-

tor with concentrated windings using genetic algorithm combined with cluster of material, *IEEE Trans. Magn.*, 2012, vol. 48, no. 2, p. 899–902.

19. Ishikawa T., Nakayama K., Kurita N. and Dawson F.P. Optimization of rotor topology in PM synchronous motors by Genetic algorithm considering cluster of materials and cleaning procedure, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2014, vol. 50, no. 2, paper no. 7015704.
20. Reshetnikov A.P., Ivshin I.V., Denisova N.V., Safin A.R., Misbakhov R. Sh., Kopylov A.M. Optimization of reciprocating linear generator parameters // *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 10, Issue 12, 28 July 2015, p. 31403–31414.
21. Kopylov A.M., Ivshin I.V., Safin A.R., Misbakhov R.Sh., Gibadullin R.R. Assessment, calculation and choice of design data for reversible reciprocating electric machine // *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 10, Issue 12, 28 July 2015, p. 31449–31462.
22. Gracheva E.I., Naumov O.V., Safin A.R. Evaluation criteria of contact group technical state concerning electrical appliances // *International Journal Of Pharmacy & Technology*, Volume 8, Issue 4, Dec. 2016, p. 27084–27091.
23. Safin A.R., Ivshin I.V., Misbakhov R. Sh., Tsvetkov A.N., Denisova N.V. Controlled rectifier simulation model development for reversible reciprocating electrical machine // *International Journal Of Pharmacy & Technology*, Volume 8, Issue 2, June 2016, p. 14059–14068.
24. Sirotkin R.O., Sirotkin O.S., Ivshin I.V., Safin A.R., Tsvetkov A.N., Dolomanyuk L.V. Titanium chemical nature features which determine its most important performance properties in linear engine-generator // *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Volume 11, Issue 16, Aug. 2016, p. 9664–9666.

Сафин Альфред Робертович

Родился в 1981 году. В 2004 году окончил Казанский государственный энергетический университет. Кандидат технических наук, доцент. Защитил диссертацию по теме «Разработка энергосберегающих схем и алгоритмов управления тяговыми двигателями постоянного тока электроподвижного состава». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 50 статей, 11 патентов, 5 учебно-методических пособий.

Хуснутдинов Рустем Рауфович

Родился в 1972 году. В 1999 году окончил Казанский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника». Кандидат физико-математических наук.

В 2008 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Ядерный квадрупольный резонанс азота N-14, новые приложения». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 20 статей, 4 патента.

Копылов Андрей Михайлович

Родился в 1991 году. В 2004 году окончил Казанский государственный энергетический университет, магистр техники и технологии. Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает ассистентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 8 статей, 5 патентов.

Максимов Виктор Владимирович

Родился в 1968 году. В 1991 году окончил Казанское высшее военное командно-инженерное училище по специальности «Инженер-механик». Кандидат технических наук, доцент. Опыт работы – 28 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 50 статей, 8 патентов, 4 учебно-методических пособия.

Цветков Алексей Николаевич

Родился в 1974 году. В 1998 году окончил Казанский государственный энергетический университет, магистр техники и технологии по направлению «Электроэнергетика». Кандидат технических наук. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Разработка методов автоматизированного проектирования, расчета и контроля магнитных систем спектрометров ЯМР». Опыт работы – 18 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет

15 статей, 5 патентов, 2 учебно-методических пособия.

Гибадуллин Рамил Рифатович

Родился в 1989 году. В 2013 году закончил магистратуру КГЭУ по направлению подготовки «Оптимизация развивающихся систем электроснабжения». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает преподавателем кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 10 статей, 5 патентов.

Safin Alfred

Was born in 1981. In 2004 he graduated from Khazan State Power Engineering University. Candidate of Engineering Science, assistant professor. Defended his dissertation on the subject «Designing of energy-conservative schemes and configurations of controlling of direct-current railway motors of electrically propelled vehicles». He has 11 years of work experience. At the present time he works as the assistant professor of «Power supply of industrial enterprises» Department in Khazan State Power Engineering University. He has 50 articles, 11 patents, 5 guidance manuals.

Khusnutdinov Rustem

He was born in 1972. In 1999 he graduated from Kazan State University with a degree in Radio Physics and Electronics. He is Candidate of physical and mathematical sciences. In 2008 he defended his thesis with topic of «Nuclear quadrupole resonance of nitrogen N-14, new applications». He has 15 years of work experience. Currently, he works as an assistant professor of «Power supply of industrial enterprises» department of Kazan State Power Engineering University. He has 20 articles, 4 patents.

Kopylov Andrey

Was born in 1991. In 2004 he graduated from Kazan State Power Engineering University, he

is Master of engineering and technologies. He has 4 years of work experience. At present he works as teaching assistant of the «Electric supply of industrial enterprises» department of Kazan State Power Engineering University. He has 8 articles, 5 patents.

Maksimov Victor

Was born in 1968. In 1991 he graduated from the Kazan Higher Military Command Engineering School, majoring in Mechanical Engineer. He is Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. He has 28 years of work experience. Currently, he works as an assistant professor of «Power supply of industrial enterprises» the department of Kazan State Power Engineering University. Has 50 articles, 8 patents, 4 study guides.

Tsvetkov Alexey

Was born in 1974. In 1998 he graduated from Kazan State Power Engineering University, he is Master of engineering and technologies of «Electrical power engineering». He is Candidate of Technical Sciences. In 2005 he defended the dissertation with subject «Development of automated design methods, calculation and control of magnetic systems of NMR spectrometers». He has 18 years of work experience. At present he works as associate professor «Electric supply of industrial enterprises» department of Kazan State Power Engineering University. He has 15 articles, 5 patents, 2 guidance manual.

Gibadullin Ramil

He was born in 1989. In 2013 he graduated from postgraduate's school of Kazan State Power Engineering University majoring in «Optimization of developing power supply systems». He has 3 years of work experience. Currently he works as a teacher at the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises of the Kazan State Energy University. He has 10 articles, 5 patents.

Помехи бортовых устройств регистрации

// Interference with on-board registration //

Попов Ю.В., д. т. н.,
Клочков Д.В.,
Научно-исследовательский центр
Центрального научно-исследовательского института ВВС МО,
г. Люберцы, Московская область

Статья посвящена рассмотрению помех, которые возникают в бортовых устройствах регистрации. Зарегистрированная информация содержит погрешности, обусловленные влиянием различных помех и возмущений, связанных с условиями полета, способами регистрации, кодирования информации. На зарегистрированную информацию воздействуют несовпадающие помехи: импульсные, флуктуационные и регулярные. В статье приводятся причины появления помех и их характеристики. Ключевые слова: бортовые устройства регистрации, импульсные помехи, флуктуационные помехи, регулярные помехи.

The article is devoted to the disturbances that occur in the on-board recording devices. Registered information contains errors, caused by the influence of various disturbances, disturbances and uncertainties related to the conditions of the flight registration methods of information coding. The registered information is influenced by diverse interferences: pulse, fluctuation and regular. This article describes causes of interference and their characteristics. Keywords: onboard recorders, impulse interference, fluctuation noise, regular disturbances.

$$z = p + \xi,$$

где p – вектор измеренных величин, структура которого зависит от типа БУР; ξ – вектор помех измерений.

При регистрации измеряемые величины подвергаются воздействию различных помех. Помехи могут иметь самую различную природу возникновения, и учесть индивидуальные особенности каждого источника помех почти невозможно. Они могут вызываться процессами, происходящими внутри БУР, а также влиянием внешних источников помех. Помехи подразделяются на совпадающие и несовпадающие [1]. Совпадающие помехи по своему характеру совпадают с зарегистрированными параметрами. Совпадающие помехи считаются недопустимыми, поэтому они сводятся к минимуму. Несовпадающие помехи, соответственно, по своему характеру не совпадают с регистрируемыми параметрами. К таким помехам относятся импульсные, флуктуационные и регулярные [2]. Следовательно, вектор помех формируется из трех составляющих:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3,$$

где ξ_1 – импульсная помеха; ξ_2 – флуктуационная помеха; ξ_3 – регулярная помеха.

Качество зарегистрированных параметров в полете оценивается на этапе оперативной (первичной) обработки информации по графикам. Графики получают при воспроизведении информации на наземном устройстве обработки (НУО) [3].

Импульсные помехи – это случайно появляющиеся импульсы произвольной формы, но обычно с интервалом не меньше длительности импульса. Импульсные помехи могут возникнуть как в аналоговой, так и в цифровой части БУР. Импульсные помехи проявляются только в случайные моменты времени, вызывая искажения, которые принято называть сбоями. Сбой достаточно просто определить по графикам изменения параметров – это скачкообразное изменение порядка числа на графике параметра. Сбои в аналоговой части, как правило, возникают в первичных преобразователях (датчиках). Сбои в цифровой части относятся к функциональным, которые совершаются в микросхемах и радиоэлементах.

Наличие сбойных точек приведет к тому, что, с одной стороны, зарегистрированный параметр нельзя будет отнести к классу имеющих ограниченную дисперсию и, с другой стороны, статистические характеристики зарегистрированного параметра будут изменяться от выборки к выборке, обуславливая смещение результатов оценивания параметров математической модели.

Импульсные помехи обладают следующими характеристиками.

Число независимо возникающих импульсов в течение любого промежутка времени подчиняется пуассоновскому распределению

$$P(n) = \frac{(\gamma T)^n}{n!} e^{-\gamma T},$$

где $P(n)$ – вероятность появления n импульсов за время T ; γ – среднее число импульсов в единицу времени.

Плотность распределения вероятностей логарифмов амплитуд импульсов определяется зависимостью

$$f(\ln y) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\right)e^{-\frac{(\ln y)^2}{2\sigma^2}}.$$

Часто форму импульсов помехи представляют экспоненциальной зависимостью

$$y(t) = A(1 - e^{-t/\tau})$$

или

$$y(t) = A_0(1 - e^{-t/\tau} \cos \omega_0 t).$$

На рис. 1 представлена импульсная помеха при регистрации параметра. Зарегистрированные параметры приведены в кодовых единицах регистрации.

Анализ рис. 1 показывает, что параметр «Положения руля высоты лев.» зарегистрирован со сбоем. Значение параметра скачкообразно изменяется на 127 кодовых единиц. Данное значение не равно весовому коэффициенту двоичного восьмиразрядного кода ($2^7 = 128$), поэтому этот сбой произошел в аналоговой части БУР.

В цифровой части, как правило, сбои имеют вес разряда, в котором произошла ошибка 2^n , где n – номер разряда, в котором произошел сбой.

Флуктуационные помехи представляют собой совокупность большого числа кратковременных нерегулярных импульсов со случайными параметрами, которые возникают в датчиках и элементах БУР. Флуктуационные помехи

относят к случайному процессу, распределение которого близко нормальному:

$$f(y) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\right)e^{-y^2/2\sigma^2}.$$

Корреляционные функции помехи часто описывают выражениями

$$R_x(\tau) = \sigma^2 e^{-a|\tau|}$$

или

$$R_x(\tau) = \sigma^2 e^{-a|\tau|} \cos \omega_0 \tau.$$

В таблице 1 представлены характеристики флуктуационных помех параметров, регистрируемых на самолете Ту-154.

Таблица 1. Характеристики флуктуационных помех

Параметр	МО	СКО
Нг	103,686	59,881
Нб	92,87	131,11
Упр	351,005	32,341
Курс	251,07	21,14
Крен	1,257	5,395
Тангаж	7,373	8,26
Алф.м	2,703	3,11
Ну	1,1137	0,2542
Nz	0,0195	0,1212
Закр.	26,337	4,234
N1	87,131	4,509
N2	85,511	6,681
N3	83,642	6,05
Эл пр	-0,891	1,404
Инт л	0,211	0,263
Инт пр	-0,261	2,246
РУД1	113,349	3,263
РУД2	113,185	2,79
РУД3	112,459	1,667
РВл	0,4289	4,7367
РВпр	0,2383	4,9091
РН	0,201	1,747
Стаб	-2,8458	0,2083
ВСК1	36,853	3,212
Q1	6799,286	255,51
ВСК2	32,598	1,764
Q2	6860,417	248,412
ВСК3	49,483	2,688
Q3	6695,27	336,157
Тнв	7,446	7,475
U27	32,952	1,642
Wx	0,0008	1,3274
Крен л.	-1,03	5,457
Крен пр.	0,058	6,127
Хрв	0,806	1,785
МЭТт	-2,8461	2,4522
Хн л	-0,915	9,526
РАкр	-0,4481	2,784
РАкурс	0,1912	2,4053
РАтанг	-0,4002	3,6094
Хэл	0,349	8,939
Гт	33,803	1,992

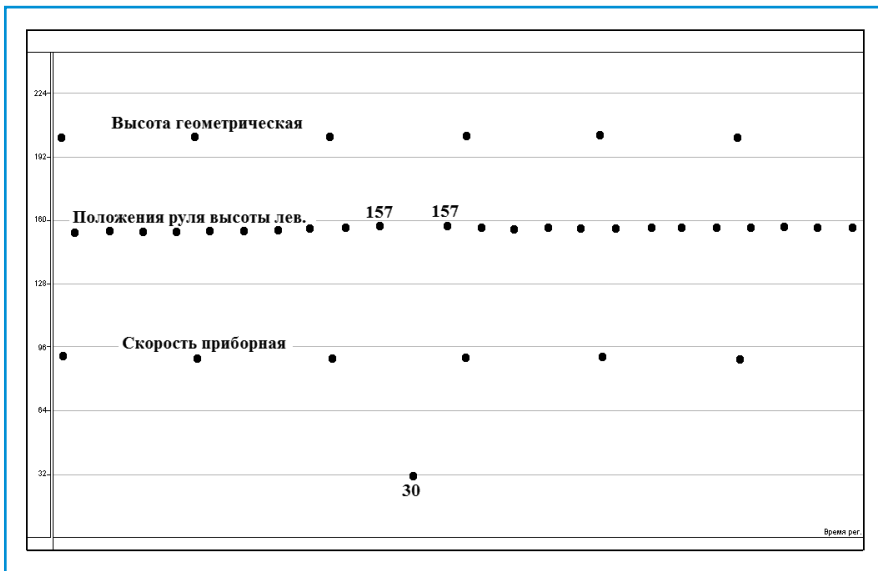


Рис. 1. Импульсная помеха при регистрации параметра

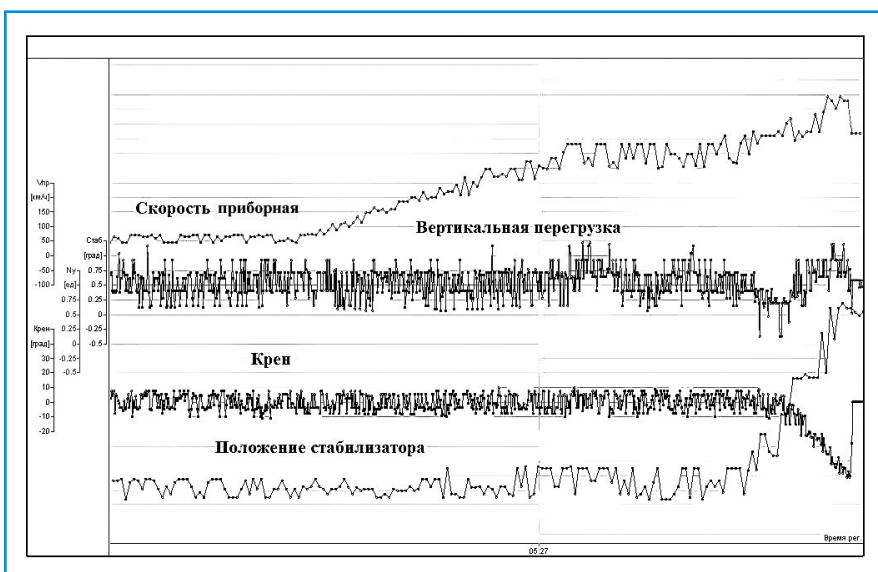


Рис. 2. Характер зарегистрированных параметров с флуктуационными помехами

Флуктуационные помехи возникли из-за отказа сглаживающего конденсатора в блоке стабилизатора напряжения, который формирует эталонное напряжение $U_{\text{э}}$ для преобразователя напряжения кода (ПКН). В БУР используется метод поразрядного кодирования для преобразования напряжения в код [4]. При реализации этого метода преобразования необходим набор из n эталонных величин от минимальной $U_{\text{э}1} = q$, равной кванту, до максимальной $U_{\text{э}n} = 2^{n-1}q$, где n – число разрядов в выходном коде. В конце преобразования $U_{\text{э}}$ уравновесится суммой эталонных напряжений, снимаемых с ПКН:

$$U_{\text{э}} \approx \sum_{i=1}^n a_i U_i,$$

где a – цифры в разрядах выходного позиционного двоичного кода (a_n, a_{n-1}, \dots, a_1); $U_{\text{э}i}$ – эталонные напряжения, снимаемые с разрядов ПКН. В результате отказа сглаживающего конденсатора эталонное напряжение формируется с флуктуационной помехой

$$\tilde{U}_{\text{э}} = U_{\text{э}} + v,$$

где v – флуктуационная помеха стабилизатора напряжения.

На рис. 2 показан характер зарегистрированных параметров при отказе сглаживающего конденсатора стабилизатора напряжения эталонного напряжения ПКН.

Регулярные помехи определяются как гармонические. При регистрации они возникают в первичных преобразователях, которые записываются переменным током. Регулярные помехи наиболее часто проявляются в виде наведенных помех с частотой напряжения питания и его гармоник

$$y(t) = A_0 + \sum_{j=1}^N A_j \cos(\omega_j t + \varphi_j).$$

Вторичная автоматизированная обработка полетной информации использует специализированные программы, в которых, как правило, реализованы

расчетные методы по определению пространственной траектории движения ВС, отказов систем и оборудования, технического состояния и ресурса агрегатов, систем и оборудования, статистических характеристик по оценке прочности и надежности элементов ВС, вида и характера предстоящего технического обслуживания, экономических характеристик. Наличие помех в полетной информации приводит к ошибкам в получении результатов вторичной обработки. Поэтому перед использованием полетной информации для вторичной обработки применяется процедура повышения достоверности данных, снижения уровня помех. Для уменьшения влияния помех на зарегистрированные параметры полета применяется сглаживание. Сглаживание параметров полета является специальной операцией усреднения (обычно с помощью интерполяционных полиномов).

Литература

1. Метрологическое обеспечение систем передачи / под ред. Б.П. Хромого. – М.: Радио и связь, 1991. – 392 с.
2. Цапенко М.П. Измерительно-информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 370 с.
3. Попов Ю.В. Обработка полетной информации, зарегистрированной бортовыми устройствами регистрации / Приборы. № 2, 2015. – С. 46–54.
4. Гитис Э.И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. – М.: Энергия, 1975. – 448 с.

Попов Юрий Васильевич

Родился в 1954 году. В 1977 году окончил Киевское высшее инженерное авиационное военное училище по специальности «Автоматическое, электро- и приборное оборудование пилотируемых летательных аппаратов», в 1987 году – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова по специальности «Прикладная математика». Док-

тор технических наук, имеет научное звание старшего научного сотрудника. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Теоретические и методические основы сохранности информации бортовых устройств регистрации при авиационных происшествиях». Опыт работы – 39 лет. В настоящее время работает старшим научным сотрудником в Научно-исследовательском институте (г. Люберцы) Центрального научно-исследовательского института ВВС МО. Имеет более 290 научных трудов, 15 авторских свидетельств и патентов.

Клочков Денис Владимирович

Родился в 1982 году. В 2005 году окончил Московский авиационный институт по специальности «Системы управления летательными аппаратами». Опыт работы – 12 лет. В настоящее время работает старшим инженером в Научно-исследовательском институте (г. Люберцы) Центрального научно-исследовательского института ВВС МО. Имеет 10 научных трудов.

Popov Yuri

He was born in 1954. In 1977 he graduated from Kiev Higher Engineering Aviation Military School majoring in «Automatic, electrical and instrumental equipment of piloted aircraft» and in 1987 he graduated Moscow State University majoring in «Applied mathematics». He is Doctor of engineering, he has academic rank of Senior Researcher. In 2005 he defended the thesis, the topic of thesis is «Theoretical and methodical bases of information safety onboard devices of registration at aviation incidents». He has 39 years of work experience. At present he works as Senior Researcher at Scientific Research Institute (Lubertsy) of Central Research Institute of Air Defense. He has more than 290 scientific papers, 15 certificates of authorship and patents.

Klochkov Denis

Was born in 1982. In 2005 he graduated from Moscow Aviation Institute majoring in «Aircraft control systems». He has 12 years of work experience. At present he works as senior engineer in Research institute of Ministry of defense (Lyubetsy). He has 10 scientific papers.

Испытания автотранспортных средств на устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям

// Tests of vehicles for resistance to external electromagnetic influences //

**Николаев П.А., д. т. н.,
ПАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти**

**Козловский В.Н., д. т. н.,
СамГТУ, г. Самара**

**Подгорний А.С.,
ПВГУС, г. Тольятти**

В статье предложен новый подход к проведению лабораторных испытаний автотранспортных средств на устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям. Предложенный подход позволяет более полно оценить помехоустойчивость автомобильного транспорта.

Ключевые слова: автотранспортное средство, электромагнитное воздействие, устойчивость, испытания.

В настоящее время автомобили являются самым эксплуатируемым видом транспорта, их число уже превышает миллиард. Автомобильный транспорт непрерывно совершенствуется. Современное бортовое электрооборудование реализуется на базе микропроцессорной техники, при этом используется сложное программное обеспечение. Естественно, что это в еще большей степени актуализирует проблемы, связанные с электромагнитной безопасностью (совместимостью) автотранспорта (ЭМС).

Наиболее важными при оценке ЭМС являются проблемы помехоустойчивости к внешним электромагнитным полям. Помимо естественных источников электромагнитных помех, постоянно увеличивается техногенный электромагнитный фон. Это связано с расширением спектра применяемых радиочастот, ростом количества мобильных и стационарных радиопередающих устройств. В совокупности все это увеличивает количество вариантов поражения автомобиля электромагнитными помехами (ЭМП). Потери или отклонения в работоспособности автомобиля при поражении от ЭМП могут быть

The article suggests a new approach to conducting laboratory tests of vehicles for resistance to external electromagnetic influences. The proposed approach allows to more fully evaluate the noise immunity of automobile transport.

Keywords: motor vehicle, electromagnetic influence, stability, tests.

незначительными, а могут и привести к потере управляемости и изменению траектории движения автомобиля. Естественно, что нарушение работоспособности бортового электрооборудования может поставить под угрозу безопасность людей и привести к значительному экономическому ущербу. Именно поэтому вопросы развития испытательной

базы для обеспечения помехоустойчивости автотранспортных средств (АТС) являются актуальными.

Современная практика испытаний базируется на международных стандартах [1, 2], согласно которым общая методика тестирования внешнего электромагнитного воздействия регламентирует расположение АТС по отношению к источнику излучения только для трех положений: передней, боковой и задней частями. Испытания проводятся преимущественно для случая фронтального позиционирования АТС к антенне (рис. 1).

На практике, работая в условиях случайной электромагнитной обстановки, автомобиль оказывается ориентированным к источникам электромагнитных помех произвольным образом (рис. 2). АТС как сложная приемная антенна в конкретный фиксированный момент времени может позиционироваться как в направлении эффективного, так и неэффективного приема. На уровень наведенных в электрических цепях помех влияют взаимное расположение и геометрические размеры отверстий и щелей кузова, объем и геометрия подкапотного



Рис. 1. Фронтальное позиционирование АТС к излучающей антенне

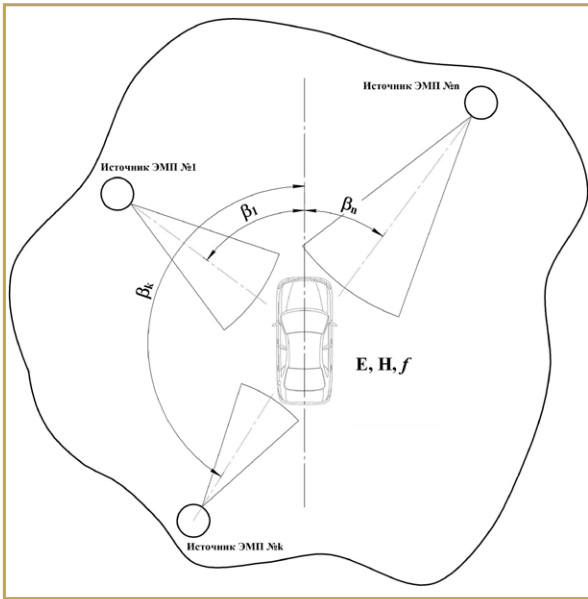


Рис. 2. Взаимное случайное расположение АТС и источников электромагнитных помех

пространства, компоновка и взаимное расположение устройств и агрегатов, длина и трасса проводов, электрические параметры схем. Также на ЭМП влияет и внешняя обстановка, например, электропроводящие свойства дорожного полотна. Если дорожное покрытие мокрое, то уровень отражения электромагнитного излучения от него интенсивнее, и оно с более высокой амплитудой проникает во внутреннее пространство АТС через нижние щели и отверстия.

Проведенный эксперимент по определению

диаграмм направленности ЭМП (рис. 3) подтверждает, что АТС является сложной и несимметричной по отношению к своей продольной оси приемной антенной. Результаты показывают, что в общем случае максимумы диаграмм на разных частотах не совпадают по направлению друг с другом. Это говорит о том, что помехоустойчивость АТС зависит от его ориентации к источнику излучения. Соответственно, методы испытаний, регламентированные стандартом R10-04, являются неполными.

Анализ диаграмм (рис. 3), полученных в результате обработки экспериментальных данных, показывает, что для более полной оценки помехоустойчивости необходимо проводить испытания на заданной частоте электромагнитного воздействия, позиционируя АТС к излучающей антенне во всем диапазоне углов азимутальной плоскости от 0 до

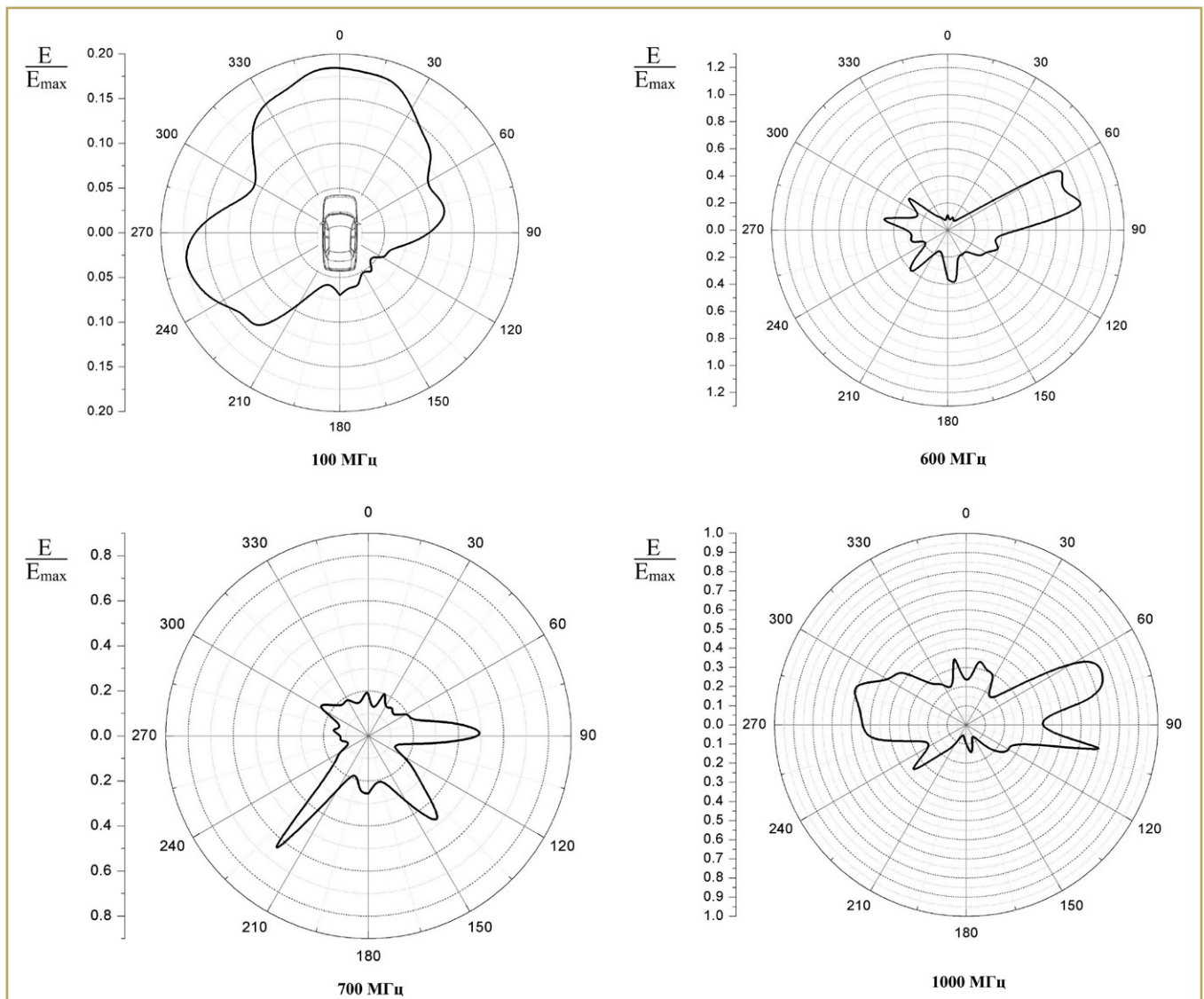


Рис. 3. Диаграммы направленности АТС как сложной антенны

360 град. Задача сводится к нахождению оптимальных параметров углового позиционирования. При этом необходимо обеспечить совмещение на минимально заданное время всех лепестков диаграмм направленности АТС с осью излучающей антенны. Воздействия осуществляются в заданной области частот, и если необоснованно выбрать маленький угловой шаг поворота или задать недостаточную скорость вращения поворотного испытательного роликового стенда с АТС, то испытания будут проводиться необоснованно длительное время.

При испытаниях возможны два случая позиционирования: дискретный и непрерывный. Первый реализуется поворотом АТС на заданный угол. Он применим при испытаниях, в которых реализуются динамические режимы, например, «Разгон – торможение» для тестирования систем ABS. Второй реализуется непрерывным вращением АТС с заданной скоростью. Он применим при испытаниях, в которых реализуются установившиеся режимы, например, ездовой цикл АТС с постоянной скоростью.

На практике позиционирование АТС относительно излучающей антенны осуществляется посредством вращения поворотного динамометрического роликового стенда.

Оптимальные параметры дискретного углового позиционирования можно определить из диаграмм

направленности АТС. Их анализ показывает, что ширина лепестков по уровню $1/\sqrt{2}$ от максимума составляет не менее 10 град. Тогда для случая дискретного позиционирования оптимальный угол поворота будет равен 10 град. При таком шаге всегда достигается условие совмещения любого лепестка диаграммы направленности АТС с направлением внешнего электромагнитного воздействия.

Для случая дискретного позиционирования характеристику помехоустойчивости можно представить в виде матрицы

$$\begin{pmatrix} E_{f_{\min}, \alpha_{\min}} & E_{f_{\min}, \alpha_{\min} + \Delta\alpha k} & \dots & E_{f_{\min}, \alpha_{\max}} \\ E_{f_{\min} + \Delta f m, \alpha_{\min}} & E_{f_{\min} + \Delta f m, \alpha_{\min} + \Delta\alpha k} & \dots & E_{f_{\min} + \Delta f m, \alpha_{\max}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{f_{\max}, \alpha_{\min}} & E_{f_{\max}, \alpha_{\min} + \Delta\alpha k} & \dots & E_{f_{\max}, \alpha_{\max}} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где E – напряженность внешнего электромагнитного воздействия, при которой наблюдалось нарушение работоспособности АТС; $f \in [f_{\min}; f_{\max}]$ – частота внешнего электромагнитного воздействия; $\alpha \in [\alpha_{\min}; \alpha_{\max}] = [0; 360]$ град. – диапазон углов поворота АТС относительно излучающей антенны; $k = 1, 2, 3, \dots; m = 1, 2, 3, \dots$

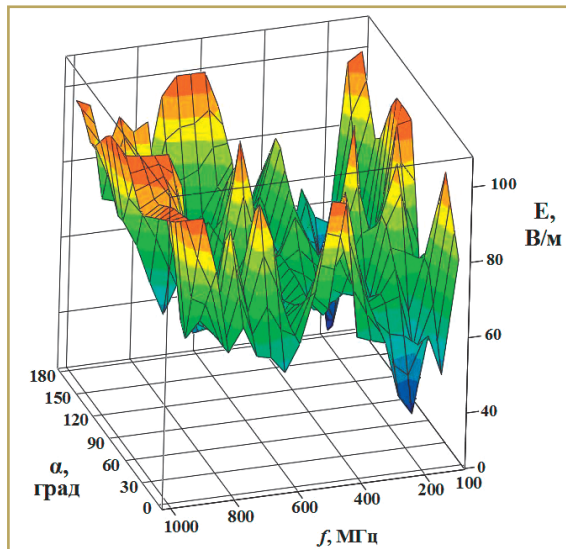


Рис. 4. Трехмерная характеристика помехоустойчивости автомобиля LADA GRANTA

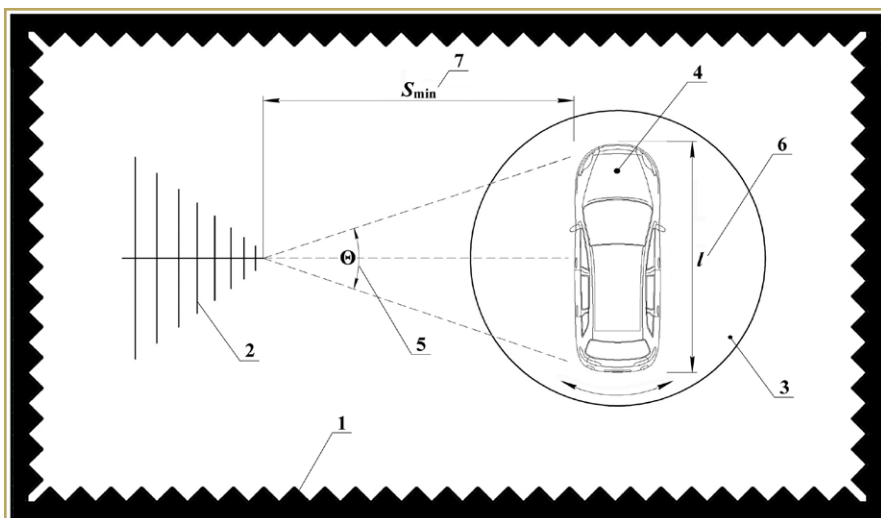


Рис. 5. Графическое обоснование выбора расстояния между излучающей антенной и АТС: 1 – испытательная безэховая камера; 2 – излучающая антенна; 3 – поворотный динамометрический роликовый стенд; 4 – АТС; 5 – угол главного лепестка диаграммы направленности в горизонтальной плоскости излучающей антенны; 6 – максимальный линейный размер АТС; 7 – минимальное расстояние между излучающей антенной и АТС

Согласно [1] испытания проводятся в диапазоне частот от 20 МГц до 2 ГГц, но если необходимо провести специальные тесты, то диапазон частот дополнительно оговаривается и может быть расширен.

При непрерывном угловом позиционировании скорость поворота должна быть выбрана так, чтобы АТС не смогло пройти без нарушения работоспособности критический сектор позиционирования, в котором оно восприимчиво к воздействию. В подавляющем большинстве случаев двух секунд электромагнитного воздействия достаточно для проявления сбоя у АТС. Отсюда угловая скорость АТС относительно излучающей антенны должна быть не более 5 град./с.

При непрерывном угловом позиционировании характеристику помехоустойчивости можно представить в виде трехмерной функции

$$E = \varphi(f, \alpha). \quad (2)$$

Ее графический пример приведен на рис. 4.

Минимальное расстояние от АТС до излучающей антенны выбирается из условия полного попадания наибольшего линейного размера АТС в главный

(основной) лепесток диаграммы направленности излучающей антенны и определяется выражением

$$S_{\min} \leq \frac{l}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\Theta}{2}\right)}, \quad (3)$$

где l – максимальный линейный размер АТС в горизонтальной плоскости; Θ – угол главного (основного) лепестка диаграммы направленности в горизонтальной плоскости излучающей антенны.

Графическое обоснование выбора расстояния между излучающей антенной и АТС представлено на рис. 5.

АТС будет соответствовать предъявляемым требованиям помехоустойчивости, если выполняется неравенство

$$E_{\min} \geq E_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{доп}}$ – минимальное допустимое значение напряженности электромагнитного воздействия, при котором работоспособность АТС не должна быть нарушена.

Для гражданского транспорта международные требования задают $E_{\text{доп}}$ равным 30 В/м в диапазоне частот от 20 МГц до 2 ГГц [1]. В практике ведущих автопроизводителей для обеспечения запаса надежности эта цифра составляет 100 В/м [4]. Для АТС специального назначения задаются более высокие уровни [3, 4, 5].

Предложенный подход при проектировании АТС делает возможным приближение процесса оценки уровня ЭМП к реальным особенностям эксплуатации в сложной электромагнитной обстановке. Результаты тестирования позволяют более полно изучить и проанализировать помехоустойчивость АТС и, в случае несоответствия требованиям, гарантированно ее доработать, повысив тем самым надежность и обеспечив электромагнитную безопасность автомобильного транспорта.

Литература

1. Правила № 10. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении электромагнитной совместимости [Текст] / Дополнение 9. – Пересмотр 4. – ЕЭК ООН, 2012.
2. ISO 11451-2. Road vehicles. Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy. Part 2: Off-vehicle radiation sources. [Текст] – 2005.
3. Козловский В.Н. Электротехнический и информационно-диагностический комплекс оценки параметров функционирования автономного транспортного объекта [Текст] / Козловский В.Н., Петровский С.В., Новикова А.П. Электротехнические и информационные комплексы и системы – 2016. – № 2, т. 12. – С. 5–10.
4. Николаев П.А. Электромагнитная совместимость автотранспортных средств [Текст] / П.А. Николаев, Л.Н. Кечиев / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: Грифон, 2015. – 424 с. – (Библиотека ЭМС).
5. ГОСТ РВ 20.39.301–98.
6. Николаев П.А. Автотранспортное средство в условиях воздействия гармонических электромагнитных полей [Текст] / П.А. Николаев, А.С. Подгорный, Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк. Технологии электромагнитной совместимости. – 2016. – № 2 (57). – С. 5–14.

Николаев Павел Александрович

Родился в 1977 году. В 2000 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Радиоинженер». Доктор технических наук. В 2012 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение электромагнитной совместимости автомобильных систем зажигания». Опыт работы – 17 лет. В настоящее время работает главным специалистом управления проектирования электрооборудования ПАО «АВТОВАЗ». Автор 88 научных трудов, в том числе 23 патентов.

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 150 научных работ, в том числе 10 монографий. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ).

Подгорный Александр Сергеевич

Родился в 1992 году. В 2014 году окончил ФГБОУ ВО «ПВГУС» по специальности «Автосервис». Опыт работы – 2 года. В настоящее время обучается в аспирантуре ФГБОУ ВО «ПВГУС». Имеет 2 научные публикации.

Nikolaev Pavel

Was born in 1977. In 2000 he graduated from Samara State Aerospace University majoring in «Radio engineer». He is Doctor of Technical Sciences. In 2012 he defended the dissertation, the theme is «Provision of electromagnetic compatibility of automobile ignition systems». He has 17 years of work experience. At present he works as leading specialist of Electrical Equipment Design Department of PJSC AVTOVAZ. He is author of 88 scientific works, including 23 patents.

Kozlovskiy Vladimir

Is an engineer, specialization is «Car and tractor electric equipment». In 1999 he graduated from Tolyatty Polytechnic Institute. Doctor of Engineering. In 2010 he defended a Dphil in the subject «Quality and safety assurance of car electric equipment system». He is an author of more than 150 scientific works, including 10 monographs. At present he works as department chairman «Theoretic and general electrotechnics» at the Samara State Technical University (SamGTU).

Podgorny Aleksandr

Was born in 1992. In 2014 he graduated from Volga Region State University of Service majoring in «Automobile service». He has 2 years of work experience. At present he studies at post-graduate school of Volga Region State University of Service. He has 2 scientific publications.

О досудебном порядке урегулирования споров при защите исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности и на средства индивидуализации

Обязательный досудебный порядок урегулирования споров, возникающих из гражданско-правовых отношений и отнесенных к компетенции арбитражных судов, введен Федеральным законом от 2 марта 2016 года № 47-ФЗ «О внесении изменений в Арбитражный процессуальный кодекс Российской Федерации».

Вместе с тем использование досудебного порядка применительно к таким способам защиты исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности и на средства индивидуализации, как требования о признании исключительного права, о пресечении действий, нарушающих право или создающих угрозу его нарушения, об изъятии материального носителя, о публикации решения суда о допущенном нарушении с указанием действительного правообладателя, об изъятии и уничтожении орудий, оборудования или иных средств, используемых или предназначенных для совершения нарушения исключительных прав (подпункты 1, 2, 4 и 5 пункта 1 и пункт 5 статьи 1252 Гражданского кодекса Российской Федерации), не соответствуют существу этих способов.

Для устранения указанных недостатков 1 июля 2017 года был принят Федеральный закон № 147-ФЗ «О внесении изменений в статьи 1252 и 1486 части четвертой Гражданского

кодекса Российской Федерации и статьи 4 и 99 Арбитражного процессуального кодекса Российской Федерации».

В законе указано, что до предъявления перечисленных требований не требуется предъявление правообладателем претензии к нарушителю, а также предложено дополнить часть 5 статьи 4 Арбитражного процессуального кодекса Российской Федерации положением, согласно которому федеральным законом могут быть предусмотрены иные, помимо прямо поименованных в ней, виды споров, по которым соблюдение претензионного или иного досудебного порядка урегулирования не является обязательным.

Предусматривается также урегулировать претензионный порядок по требованиям правообладателей о возмещении убытков или выплате компенсации в случае, если участниками данного спора являются юридические лица и (или) индивидуальные предприниматели. Иск о возмещении убытков или выплате компенсации может быть предъявлен в случае полного или частичного отказа удовлетворить претензию либо неполучения ответа на нее в тридцатидневный срок со дня направления претензии, если иной срок не предусмотрен договором.

Законом также предлагается распространить досудебный порядок урегулирования на споры о досрочном

прекращении правовой охраны товарного знака вследствие его неиспользования, в целях снижения конфликтности в этой сфере. Для этого пункт 1 статьи 1486 Гражданского кодекса Российской Федерации изложен в новой редакции, предусматривающей порядок взаимодействия лица, заинтересованного в прекращении правовой охраны товарного знака, и правообладателя.

Если в течение двух месяцев со дня направления предложения заинтересованного лица правообладатель не подаст заявление об отказе от права на товарный знак и не заключит договор об отчуждении заинтересованному лицу исключительного права на товарный знак, заинтересованное лицо в тридцатидневный срок по истечении указанных двух месяцев может обратиться в суд с иском о досрочном прекращении правовой охраны товарного знака вследствие его неиспользования.

По мнению разработчиков закона, предлагаемые изменения создадут предпосылки самостоятельного урегулирования сторонами возникших между ними споров и позволят обеспечить баланс интересов правообладателя и заинтересованных лиц.

Краснов Л.А.

Редакция журнала «Электроника и электрооборудование транспорта»

Сведения об авторах

Д.т.н., профессор
Зечихин Борис Семенович
+7-499-158-00-10

Гулямов Камол Хикматович
+7-967-106-40-70

К.т.н., доцент
Иващенко Валерий Олегович
+7-921-333-42-27

К.т.н., доцент
Доманов Виктор Иванович
+7-842-241-18-63

Д.т.н., профессор
Серебряков Александр Сергеевич
+7-906-355-65-64

Д.т.н., профессор
Горский Анатолий Николаевич
+7-921-334-77-17

К.т.н., доцент
Ларченко Алексей Владимирович
+7-924-578-11-08

К.т.н., доцент
Сафин Альфред Робертович
+7-952-044-16-05

Д.т.н., с.н.с.
Попов Юрий Васильевич
+7-916-384-48-73

Д.т.н.
Николаев Павел Александрович
+7-917-122-46-90

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: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2017 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.