

Исследование электромагнитных процессов в системе «контактная сеть — электровоз» при уменьшении минимального угла открытия тиристорov в выпрямительно-инверторном преобразователе

Ю. М. КУЛИНИЧ, Д. Ю. ДРОГОЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС), Хабаровск, 680021, Россия

Аннотация. Предложен новый способ повышения коэффициента мощности электровоза за счет изменения минимального угла открытия тиристорov α_0 выпрямительно-инверторного преобразователя. Уменьшение угла α_0 осуществляется за счет изменения как структуры преобразователя, так и зоны его регулирования. Разработано устройство формирования импульсов угла α_0 , исключающее влияние до- и послекоммутационных колебаний напряжения. В среде MatLab/Simulink создана имитационная модель «контактная сеть — электровоз», учитывающая нелинейность продольных параметров контактной сети. Проанализировано влияние уменьшения угла α_0 на характер до- и послекоммутационных колебаний напряжения, рассчитаны параметры переходных процессов. Особое внимание уделено вопросам моделирования параметров тяговой сети. Принятые в модели первичные параметры сети соответствуют теоретическим параметрам для выбранного типа контактной подвески. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что уменьшение минимального угла открытия тиристорov приводит к повышению коэффициента мощности электровоза.

Ключевые слова: электровоз; контактная сеть; имитационная модель; MatLab/Simulink; нелинейные распределенные параметры; коэффициент мощности

Введение. Исходя из требований стандарта [1] для электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями коэффициент мощности в тяговом режиме должен составлять не менее 0,9. На сети российских железных дорог, электрифицированных на переменном токе, эксплуатируются преимущественно электровозы серии 2ЭС5К, 3ЭС5К, ЭП1М с зонно-фазовым регулированием напряжения на тяговых двигателях. Одним из недостатков этих электровозов является относительно низкое значение коэффициента мощности K_m , достигающее в лучшем случае в тяговом режиме значения 0,84.

Коэффициент мощности потребителя электрической энергии в общем случае определяется выражением

$$K_m = \cos \varphi v, \quad (1)$$

где φ — угол сдвига между первыми гармониками питающего напряжения и потребляемого тока; v — коэффициент искажения формы потребляемого тока.

Угол φ для многозонного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электровоза в режиме тяги рассчитывается по приближенной формуле

$$\varphi \approx \alpha_0 + \frac{\gamma}{2}, \quad (2)$$

где α_0 — минимальный угол открытия тиристорov; γ — угол, характеризующий продолжительность процесса коммутации тока в тиристорах ВИП.

Из анализа выражений (1) и (2) следует, что повышение значения K_m достижимо за счет уменьшения минимального угла открытия тиристорov α_0 и сокращения продолжительности коммутации γ , а также путем улучшения формы тока, потребляемого электровозом.

Уменьшение угла α_0 за счет изменения структуры преобразователя. В электровозах серии «Ермак» 2ЭС5К, 3ЭС5К каждое тиристорное плечо ВИП состоит из четырех параллельных ветвей, в каждую из которых последовательно включены по два тиристора. В электровозах ЭП1М каждое плечо имеет пять параллельных ветвей, тоже состоящих из двух последовательно соединенных тиристорov.

Для упрощения конструкции преобразователя и повышения коэффициента мощности предлагается в каждой ветви ВИП заменить один тиристор $VS5-VS8$ диодом $VD1-VD4$ того же класса по обратному напряжению и с той же величиной прямого предельного тока (рис. 1, а, б). В результате такого изменения в конструкции ВИП уменьшается необходимое для открытия тиристора прямое анодное напряжение, поскольку все напряжение ветви прикладывается практически к одному тиристору, последовательно включенному с диодом. В этой связи для открытия

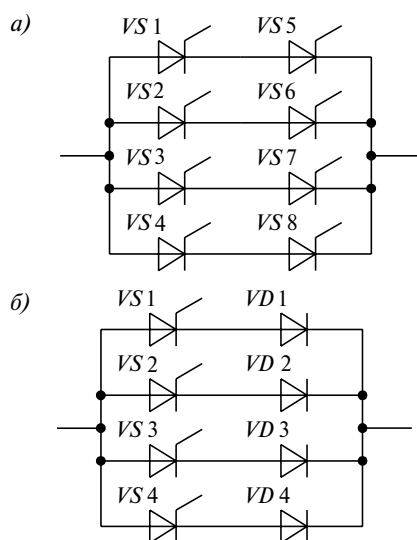


Рис. 1. Тиристорное плечо электроваза 2ЭС5К:
а — штатное; б — модернизированное
Fig. 1. Thyristor arm of a 2ЭС5К electric locomotive:
а — full-time; б — modernized

тиристора потребуется вдвое меньше анодного напряжения, что позволяет двукратно уменьшить минимальный угол открытия тиристорov α_0 на каждой зоне регулирования.

Уменьшение угла α_0 за счет модернизации тиристорного плеча позволяет также сократить участки напряжения отрицательной полярности в форме кривой выпрямленного напряжения u_d и в соответствии с (1) и (2) увеличить коэффициент мощности электроваза K_m [2].

Изменение угла α_0 в зависимости от зоны регулирования. В настоящее время блоки управления выпрямительно-инверторными преобразователями электровазов переменного тока формируют фиксированное значение минимального угла открытия тиристорov $\alpha_0 = 9 \pm 2^\circ$ эл. на всех четырех зонах регулирования.

Уменьшение минимального угла открытия тиристорov α_0 можно осуществить на второй, третьей и четвертой зонах регулирования при обеспечении потенциальных условий для их надежного открытия. Уровень напряжения, при котором будет обеспечено гарантированное открытие тиристорov, определим на первой зоне регулирования, где анодное напряжение на плечах тиристорov VS_3 , VS_5 ВП в момент их включения составляет

$$U_{\text{откр}} = \sqrt{2} U_{\text{т1}} \sin 9^\circ = \sqrt{2} \cdot 315 \cdot 0,156 \approx 70 \text{ В}, \quad (3)$$

где $U_{\text{т1}} = 315 \text{ В}$ — действующее значение напряжения одной секции вторичной обмотки тягового трансформатора.

Это означает, что такое напряжение на двух последовательно соединенных тиристорах одной ветви плеча ВП обеспечивает их открытие в начале полупериода при всех возможных искажениях формы сетевого напряжения.

Определим значения углов α_0 , при которых на второй и последующих зонах регулирования будет обеспечен уровень напряжения, равный $U_{\text{откр}}$. Для этого в графическом виде (рис. 2) представим начальные участки кривых анодного напряжения на первой и последующих зонах регулирования, а также уровень напряжения $U_{\text{откр}}$.

Из рис. 2 видно, что необходимое для открытия тиристорov анодное напряжение $U_{\text{откр}} = 70 \text{ В}$ достигается на второй, третьей и четвертой зонах регулирования при углах α_0 , равных соответственно $4,5^\circ$ эл., $3,0^\circ$ эл. и $2,25^\circ$ эл. [3, 4].

В результате имитационного моделирования был выполнен расчет коэффициента мощности для штатной схемы электроваза ($\alpha_0 = 9^\circ$ эл.) и для модернизированной схемы с $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл. и $\alpha_0 = 2,25^\circ$ эл. Моделирование осуществлялось при постоянном токе двигателя $I_d = 810 \text{ А}$ и угле регулирования $\alpha_{\text{рег}} = 90^\circ$ эл. По выполненным расчетам установлено, что значения K_m составили: для штатной схемы с $\alpha_0 = 9^\circ$ эл. — 0,701, для модернизированной схемы с $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл. — 0,713, с $\alpha_0 = 2,25^\circ$ эл. — 0,718. Таким образом, уменьшение угла α_0 способствует увеличению значений K_m .

Формирователь синхронизирующих импульсов. Увеличение грузонапряженности Восточного полигона железных дорог РФ приводит к тому, что суммарная мощность электровазов, одновременно находящихся на межподстанционной зоне, становится соизмеримой с мощностью тяговой подстанции. В результате этого возникают искажения формы кривой питающего напряжения, вызывающие сбои в системе управления электроваза [5]. Искажения формы кривой напряжения связаны как с провалами напряжения в начале полупериода, так и с высокочастотными составляющими в форме этого напряжения, возникающими в моменты начала и окончания коммутации тиристорov ВП электроваза [6, 7]. Для устранения этих явлений существуют два основных способа, заключающиеся либо в применении метода разнофазного управления преобразователями электроваза, предложенного учеными ВНИИЖТ [8], либо в адаптации электронного оборудования электроваза при работе с искажениями формы кривой питающего напряжения.

В сложных условиях электроснабжения, когда мощность подстанции соизмерима с суммарной мощностью электровазов, например на Братском отделении Восточно-Сибирской железной дороги, наблюдаются сильные искажения формы кривой питающего

напряжения, которые характеризуются многократными переходами нулевой линии в течение одного полупериода напряжения основной частоты. В этом случае для формирования минимальных углов открытия α_0 целесообразно применение устройства синхронизации импульсов [9, 10]. Результаты имитационного моделирования работы устройства представлены на рис. 3, из которого следует, что при сильных искажениях сетевого напряжения U_c синхронизирующие импульсы (СИ) формируются в точках естественного перехода напряжения основной частоты u через нулевую линию.

В ДВГУПС разработано и запатентовано устройство для формирования импульсов угла α_0 при искаженной форме питающего напряжения [11]. Так как искажения формы питающего напряжения характерны только для начала полупериода, в устройстве реализован принцип формирования угла α_0 по форме напряжения не в начале, а в конце предшествующего полупериода.

На рис. 4 представлена упрощенная структурная схема запатентованного устройства для формирования минимальных углов открытия тиристоров α_0 [9]. (В указанном источнике дано подробное описание принципа его работы.)

Генерируемый устройством выходной сигнал $U_{\text{вых}} = U_{\alpha_0}$ соответствует минимальному углу открытия тиристоров α_0 , который не зависит от искажения формы напряжения слежения $U_{\text{сл}}$, связанного с коммутацией. Другим преимуществом устройства является отсутствие статической ошибки при формировании сигнала U_{α_0} , так как в структуре заявляемого устройства не применяется автоматический регулятор. Это позволяет повысить точность формирования импульсов угла α_0 и, соответственно, увеличить коэффициент мощности электровоза.

Влияние уменьшения угла α_0 на послекоммутационные колебания напряжения. Исследуем влияние величины минимального угла открытия тиристоров α_0 на форму питающего напряжения на токоприемнике электровоза U_c . Известно, что начало и окончание сетевой и фазной коммутации сопровождается появлением свободных высокочастотных колебаний в форме напряжения U_c [12]. Анализ электромагнитных процессов, происходящих в контактной сети с распределенными параметрами в штатном режиме работы электровоза с минимальным углом открытия тиристоров $\alpha_0 = 9^\circ$ эл., посвящены работы [13, 14].

Рассмотрим частный случай для мощной системы тягового электроснабжения без усиления высших гармоник токов и напряжений в тяговой сети, характерных для протяженных линий электропередач, питающих тяговые подстанции, и непротяженной тяговой сети (20 км).

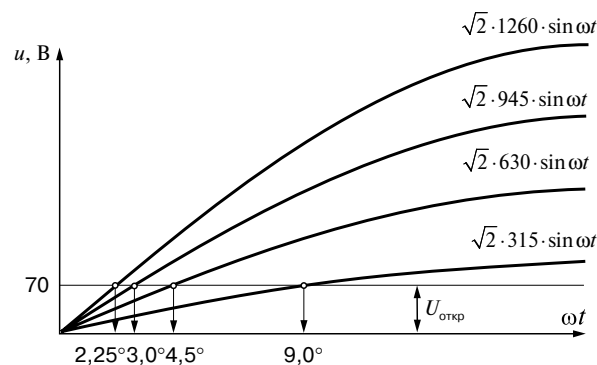


Рис. 2. Определение значений минимального угла открытия тиристоров α_0

Fig. 2. Determination of the minimum thyristor opening angle α_0

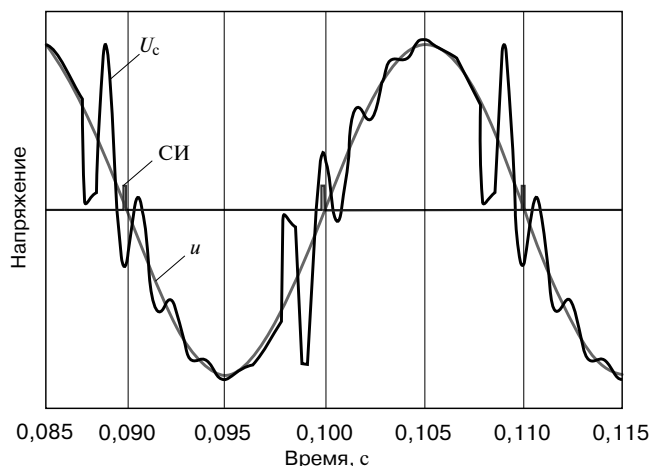


Рис. 3. С моделированное напряжение на токоприемнике электровоза U_c и сигнал синхрои импульсов (СИ) относительно напряжения основной частоты u

Fig. 3. Simulated voltage on the current collector of the electric locomotive U_c and signal of synchronizing pulse (СИ) relative to the voltage of the fundamental frequency u

Промоделируем электромагнитные процессы на токоприемнике электровоза, находящегося на середине межподстанционной зоны с минимальным углом открытия тиристоров $\alpha_0 = 9^\circ$ эл. и $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл. Результаты моделирования напряжения на токоприемнике электровоза для штатной и модернизированной схемы приведены на рис. 5, а и б соответственно.

Из анализа рис. 5 довольно сложно определить характер до- и послекоммутационных процессов в кривой сетевого напряжения, хотя на рис. 5, б заметно снижение высокочастотной составляющей в форме напряжения U_c . Для более детального анализа формы сетевого напряжения воспользуемся методикой исследования, приведенной в [13]. Для этого выбираем контактную подвеску с несущим тросом ПБСМ-95 и контактным проводом МФ-100. Контактная сеть при

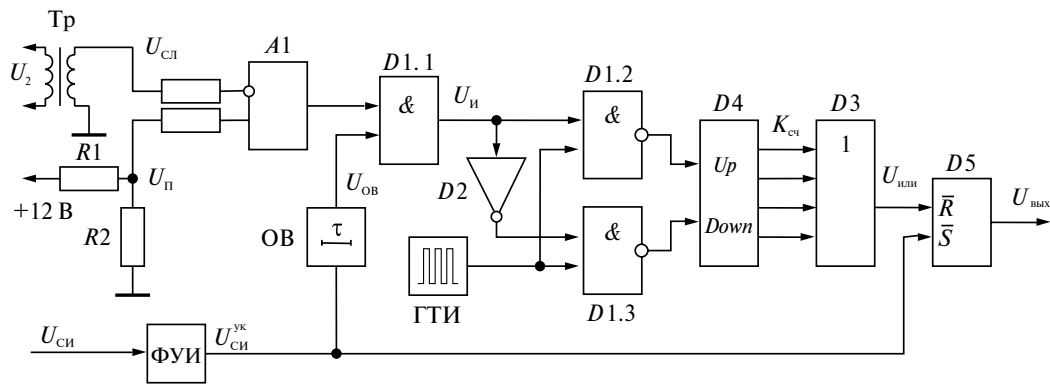

Рис. 4. Структурная схема устройства по формированию угла α_0 [9]

Fig. 4. Block diagram of the device for forming an angle α_0 [9]

моделировании представляется в виде Г-образной схемы замещения участка контактной сети [15] длиной 20 000 м в виде последовательного включения Г-образных элементарных участков длиной 400 м, каждый из которых имеет первичные параметры R_0, L_0 , рассчитываемые по формуле (4), $G_0 = 1/15\,000\,000$ См, $C_0 = 0,0126$ мкФ. Значения составляющих в формуле (4) равны: $L_{1-1} = 0,248$ мГн, $R_{1-1} = 0,05307$ Ом, $L_{1-2} = 0,044$ мГн, $R_{1-2} = 0,4668$ Ом [16]. Схема замещения контактной сети приведена на рис. 6.

Нелинейные параметры R_0, L_0 зависят от угловой частоты ω :

$$\left. \begin{aligned} R_0(\omega) &= R_{1-1} + \frac{R_{1-2}\omega^2 L_{1-2}^2}{R_{1-2}^2 + \omega^2 L_{1-2}^2}; \\ L_0(\omega) &= L_{1-1} + \frac{R_{1-2}L_{1-2}}{R_{1-2}^2 + \omega^2 L_{1-2}^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рассмотрим влияние скачка и спада напряжения на входе участка контактной сети и форму напряже-

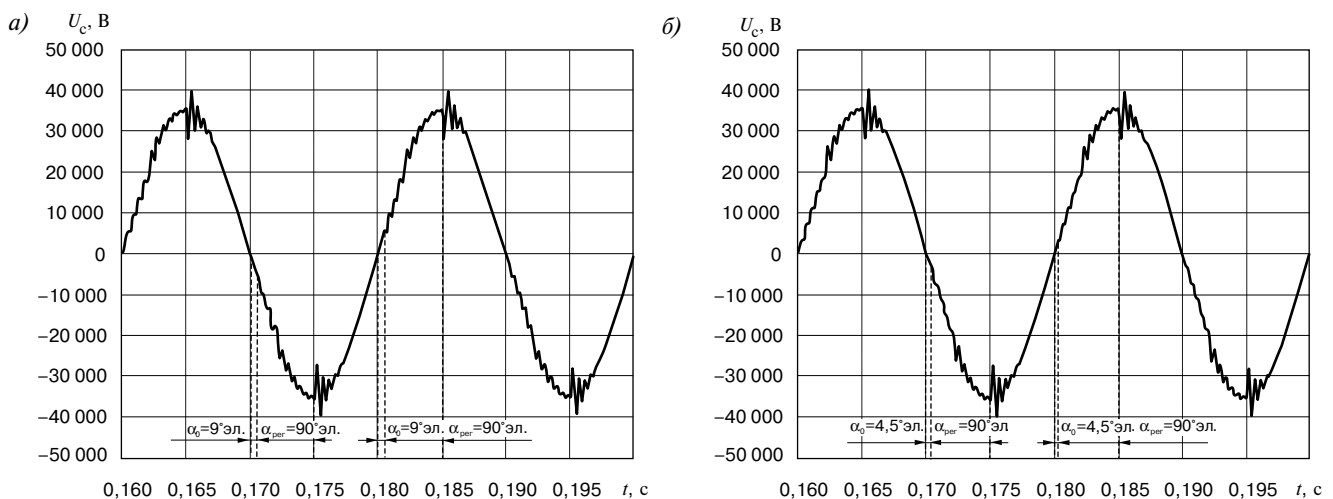
ния на выходе линии (токоприемнике электроваза). Расчеты переходных процессов в модели контактной сети выполнены в среде проектирования MatLab/Simulink [17]. Уменьшение напряжения возникает в начале коммутации при $\alpha_0 = 9^\circ$ эл. (штатная схема), при $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл. (модернизированная схема) и составляет соответственно

$$U_{9^\circ} = \sqrt{2} \cdot 25\,000 \cdot \sin 9^\circ = 5531 \text{ В};$$

$$U_{4,5^\circ} = \sqrt{2} \cdot 25\,000 \cdot \sin 4,5^\circ = 2774 \text{ В}.$$

В результате уменьшения напряжения появляются высокочастотные колебания в форме напряжения U_c , представленные на рис. 7, 8.

Окончание сетевой коммутации сопровождается скачком напряжения на двигателе на величину ΔU . В результате моделирования установлено, что приращение напряжения с учетом коммутации составило 308 В для $\alpha_0 = 9^\circ$ эл. и 301 В для $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл. Реакция системы при скачках напряжения на токоприемнике


Рис. 5. Форма напряжения на токоприемнике электроваза при $\alpha_0 = 9^\circ$ эл. (а) и $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл. (б)
Fig. 5. Voltage shape at the current collector of an electric locomotive at $\alpha_0 = 9^\circ$ el. (a) and $\alpha_0 = 4,5^\circ$ el. (б)

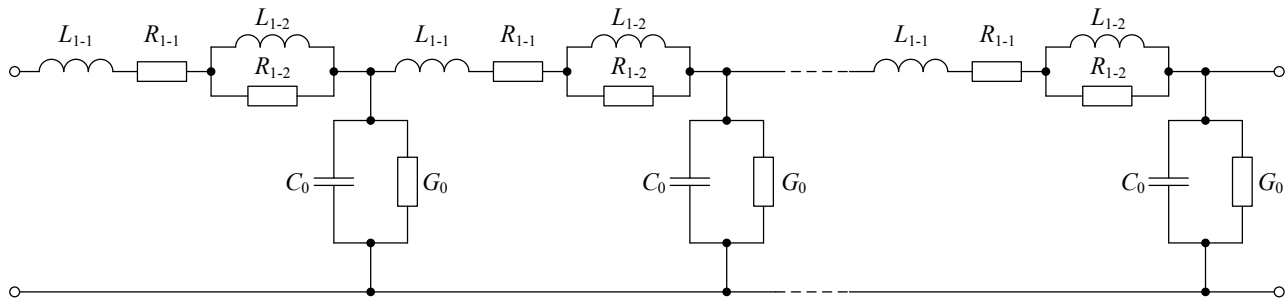


Рис. 6. Модель контактной сети, учитывающая нелинейность продольных параметров
Fig. 6. Contact network model that takes into account the nonlinearity of the longitudinal parameters

электропровода в зависимости от угла α_0 после окончания коммутации представлена на рис. 9, 10.

Из анализа рис. 7, 9 следует, что начало коммутации при угле $\alpha_0 = 9^\circ$ эл. вызывает колебания напряжения с начальной частотой 2770 Гц и наибольшей амплитудой $U_{m9d} = 6968$ В. Окончание коммутации сопровождается начальной частотой 2760 Гц и максимальной амплитудой $U_{m9u} = 49\,963$ В. Длительность переходного процесса в обоих случаях составляет 0,008 с.

Из анализа рис. 8, 10 следует, что начало коммутации при угле $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл. модернизированной схемы вызывает колебания напряжения с начальной частотой 2770 Гц и максимальной амплитудой $U_{m4,5d} = 3495$ В. Окончание коммутации сопровождается начальной частотой 2760 Гц и максимальной амплитудой $U_{m4,5u} = 48\,755$ В. Длительность переходного процесса в обоих случаях тоже составляет 0,008 с.

Таким образом, уменьшение угла α_0 с 9 до $4,5^\circ$ эл. приводит к снижению начальной амплитуды высокочастотных колебаний напряжения с 6968 до 3495 В при той же частоте высокочастотных колебаний.

Расчеты параметров переходного процесса. Как показали результаты имитационного моделирования, полученные значения частот и напряжений зависят от параметров контактной сети. В соответствии с [13] частота свободных колебаний напряжения $f_{св}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$f_{св} = \frac{1}{t_n} = \frac{1}{0,000361} \approx 2770 \text{ Гц}, \quad (5)$$

где $t_n = 0,000361$ с — период колебаний (см. рис. 9).

Логарифмический декремент затухания d рассчитывается как

$$d = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} = \ln \frac{42\,209}{40\,445} \approx 0,04. \quad (6)$$

где $A_i = 42\,209$ В — амплитуда напряжения первого периода (см. рис. 9); $A_{i+1} = 40\,445$ В — амплитуда второго периода (см. рис. 9).

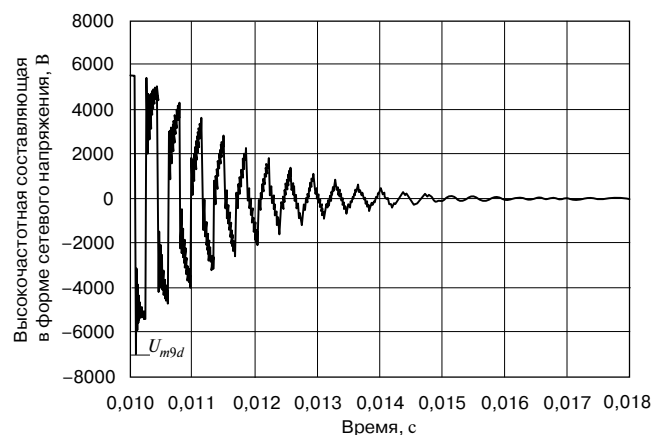


Рис. 7. Реакция системы после начала коммутации на спад напряжения при $\alpha_0 = 9^\circ$ эл.

Fig. 7. Reaction of the system after the start of switching to a voltage drop at $\alpha_0 = 9^\circ$ el.

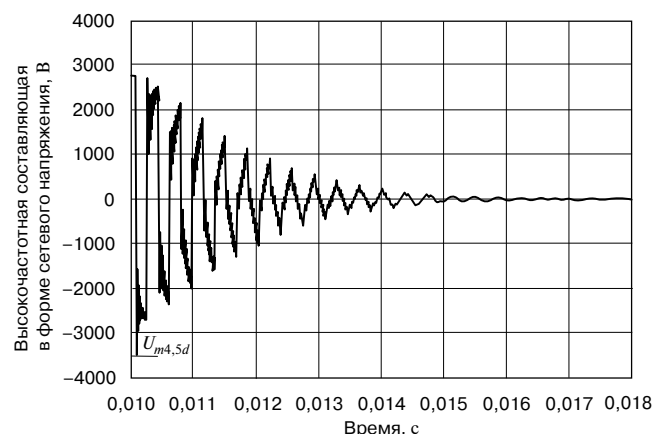


Рис. 8. Реакция системы после начала коммутации на спад напряжения при $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл.

Fig. 8. Reaction of the system after the start of switching to a voltage drop at $\alpha_0 = 4,5^\circ$ el.

Степень затухания α_3 определяется по формуле

$$\alpha_3 = \frac{d}{t_n} = \frac{0,04}{0,000361} \approx 110 \text{ с}^{-1}. \quad (7)$$

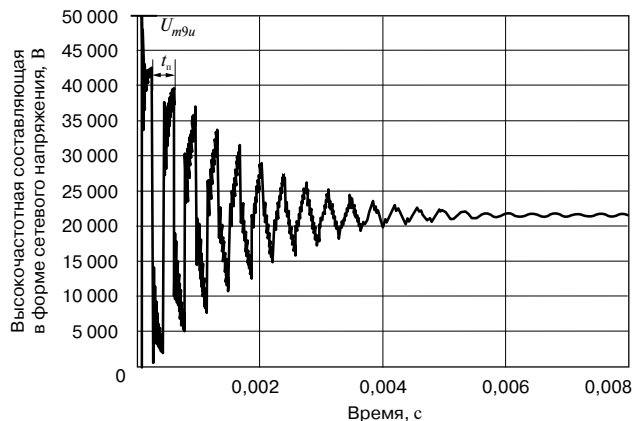


Рис. 9. Реакция системы после окончания коммутации на скачок напряжения, $\alpha_0 = 9^\circ$ эл.

Fig. 9. Reaction of the system after the end of switching to a voltage drop at $\alpha_0 = 9^\circ$ el.

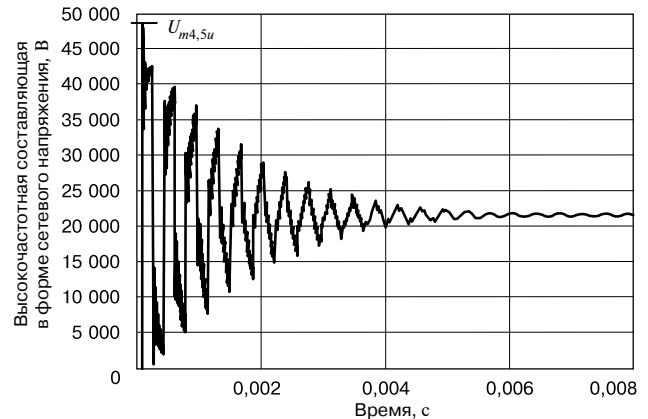


Рис. 10. Реакция системы после окончания коммутации на скачок напряжения, $\alpha_0 = 4,5^\circ$ эл.

Fig. 10. Reaction of the system after the end of switching to a voltage drop at $\alpha_0 = 4,5^\circ$ el.

Относительное затухание n рассчитывается как

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f_{\text{св}}}{\alpha_3}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2770}{110}\right)^2}} \approx 0,00632. \quad (8)$$

Частота собственных колебаний напряжения f_c определяется из выражения

$$f_c = \frac{\alpha_3}{2\pi n} = \frac{110}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,00632} \approx 2772 \text{ Гц}. \quad (9)$$

Рассчитанная частота собственных колебаний f_c практически совпадает с частотой $f_{\text{св}}$, определенной графически, что свидетельствует об адекватности выполненных расчетов.

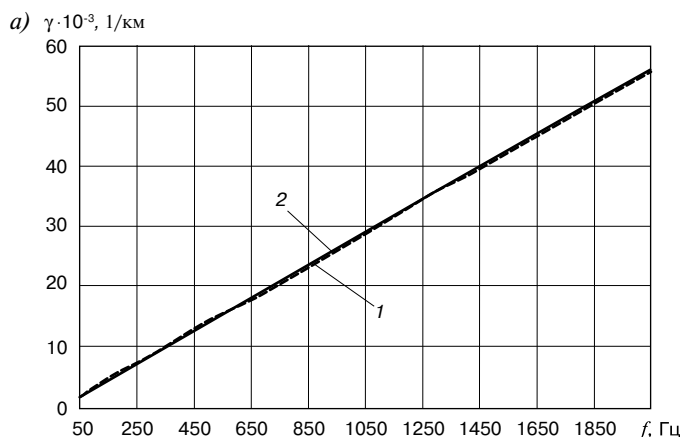


Рис. 11. Зависимость постоянной распространения волны γ от частоты колебаний f (а) и оценка сходимости теоретических и расчетных значений (б): 1 — теоретические значения; 2 — расчетные значения; 3 — зависимость расчетного значения γ от теоретического при одинаковых частотах; 4 — линия тренда

Fig. 11. Dependence of the wave propagation constant γ on the oscillation frequency f (a) and estimation of the convergence of theoretical and calculated values (б): 1 — theoretical values; 2 — calculated values; 3 — dependence of the calculated value γ on the theoretical value at the same frequencies; 4 — trend line

Оценим сходимость теоретических [18] и расчетных данных для выбранной контактной подвески ПБСМ-95 + МФ-100. Оценку осуществим путем сравнения вторичных параметров тяговой сети.

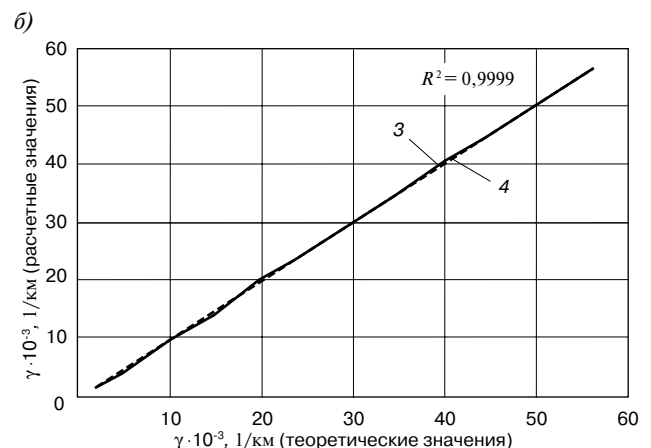
Постоянная распространения волны γ рассчитывается по формуле [19]:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}, \quad (10)$$

где α — коэффициент затухания, Нп/км; β — коэффициент фазы, рад/км; j — мнимая единица.

Волновое сопротивление Z_b рассчитывается по формуле

$$Z_b = \alpha_b + j\beta_b = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}, \quad (11)$$



где α_v, β_v — вещественная и мнимая части сопротивления Z_v соответственно.

Аргумент волнового сопротивления φ_v определяется из выражения

$$\varphi_v = \arctg \frac{\beta_v}{\alpha_v}. \quad (12)$$

Результаты расчетов по формулам (9)–(12) коэффициента затухания α , коэффициента фазы β , постоянной распространения волны γ , волнового сопротивления Z_v и отрицательной величины аргумента волнового сопротивления φ_v для различных частот сведены в таблицу, в которой для сравнения приведе-

ны также соответствующие им теоретические данные [18, с. 158].

Проанализируем характер полученных теоретических и расчетных значений. Для этого построим диаграммы зависимостей $\gamma(f), Z_v(f), -\varphi_v(f)$ и оценим сходимость теоретических и расчетных данных (рис. 11–13).

По результатам оценки сходимости с учетом коэффициента детерминации R^2 установлено, что его значение составляет $R^2 = 0,9999$ для постоянной распространения волны γ , $R^2 = 0,9444$ — для волнового сопротивления Z_v , $R^2 = 0,9629$ — для аргумента волнового сопротивления $-\varphi_v$. Полученные значения

Сравнение вторичных параметров тяговой сети
Comparison of secondary parameters of the traction network

Частота колебаний f , Гц	Теоретические данные					Расчетные данные				
	$\alpha \cdot 10^{-3}$, Нп/км	$\beta \cdot 10^{-3}$, рад/км	$\gamma \cdot 10^{-3}$, 1/км	Z_v , Ом	$-\varphi_v$, град.	$\alpha \cdot 10^{-3}$, Нп/км	$\beta \cdot 10^{-3}$, рад/км	$\gamma \cdot 10^{-3}$, 1/км	Z_v , Ом	$-\varphi_v$, град.
50	0,316	1,575	1,61	173,5	11° 20'	0,423	1,484	1,543	169,3	14° 52'
150	0,450	4,540	4,54	163,0	5° 40'	0,463	4,309	4,334	158,6	5° 47'
250	0,600	7,200	7,20	160,0	4° 30'	0,515	7,156	7,174	157,5	3° 54'
350	0,725	10,00	10,00	158,2	4° 00'	0,590	9,997	10,01	157,0	3° 14'
450	0,850	13,12	13,12	157,0	3° 43'	0,684	12,83	12,85	156,7	2° 56'
550	0,975	15,80	15,80	156,0	3° 30'	0,796	15,65	15,67	156,3	2° 49'
650	1,100	18,20	18,20	154,5	3° 20'	0,922	18,45	18,47	156,0	2° 47'
750	1,220	21,00	21,00	153,7	3° 15'	1,059	21,24	21,26	155,6	2° 47'
850	1,340	24,00	24,00	152,8	3° 10'	1,202	24,01	24,04	155,2	2° 48'
950	1,450	26,80	26,80	152,0	3° 05'	1,349	26,76	26,80	154,8	2° 50'
1050	1,550	29,50	29,50	151,2	3° 01'	1,498	29,50	29,54	154,4	2° 51'
1150	1,650	32,20	32,20	150,5	3° 00'	1,646	32,23	32,27	154,0	2° 53'
1250	1,760	34,80	34,80	150,0	2° 54'	1,792	34,94	34,99	153,6	2° 54'
1350	1,870	37,40	37,40	149,6	2° 53'	1,933	37,65	37,70	153,2	2° 54'
1450	1,980	40,00	40,00	149,3	2° 51'	2,069	40,34	40,39	152,9	2° 54'
1550	2,110	42,80	42,80	149,0	2° 49'	2,200	43,02	43,08	152,5	2° 54'
1650	2,210	45,60	45,60	148,7	2° 47'	2,324	45,70	45,75	152,2	2° 53'
1750	2,320	48,30	48,30	148,5	2° 45'	2,442	48,36	48,42	151,9	2° 52'
1850	2,420	50,90	50,90	148,4	2° 45'	2,554	51,03	51,09	151,6	2° 50'
1950	2,530	53,60	53,60	148,4	2° 43'	2,659	53,68	53,75	151,3	2° 49'
2050	2,640	56,20	56,20	148,3	2° 43'	2,758	56,34	56,40	151,0	2° 47'

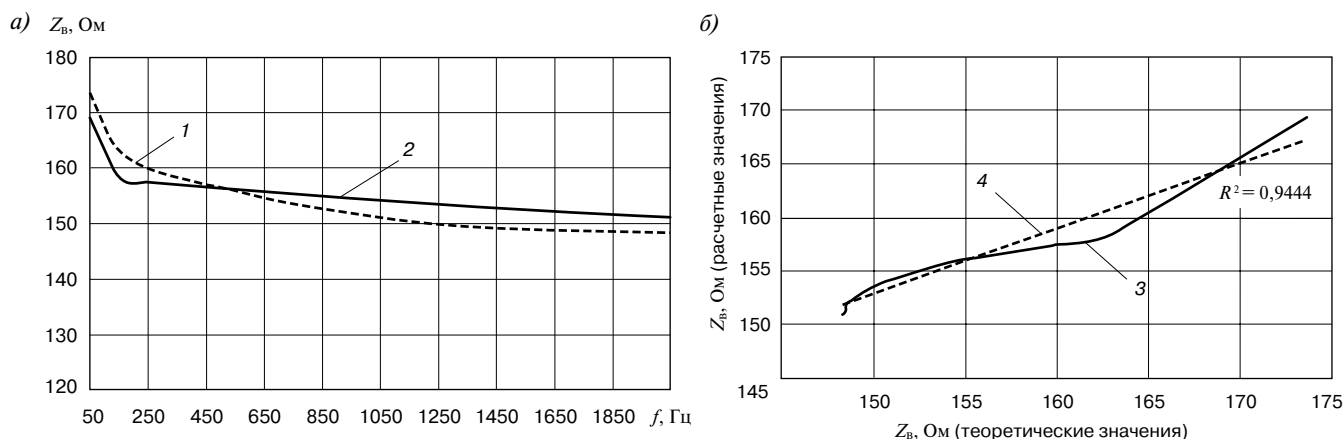


Рис. 12. Зависимость волнового сопротивления Z_b от частоты колебаний f (а) и оценка сходимости теоретических и расчетных значений (б): 1 — теоретические значения; 2 — расчетные значения; 3 — зависимость расчетного значения Z_b от теоретического при одинаковых частотах; 4 — линия тренда

Fig. 12. Dependence of the wave impedance Z_b on oscillation frequency f (a) and estimation of convergence of theoretical and calculated values (b): 1 — theoretical values; 2 — calculated values; 3 — dependence of the calculated value Z_b on the theoretical value at the same frequencies; 4 — trend line

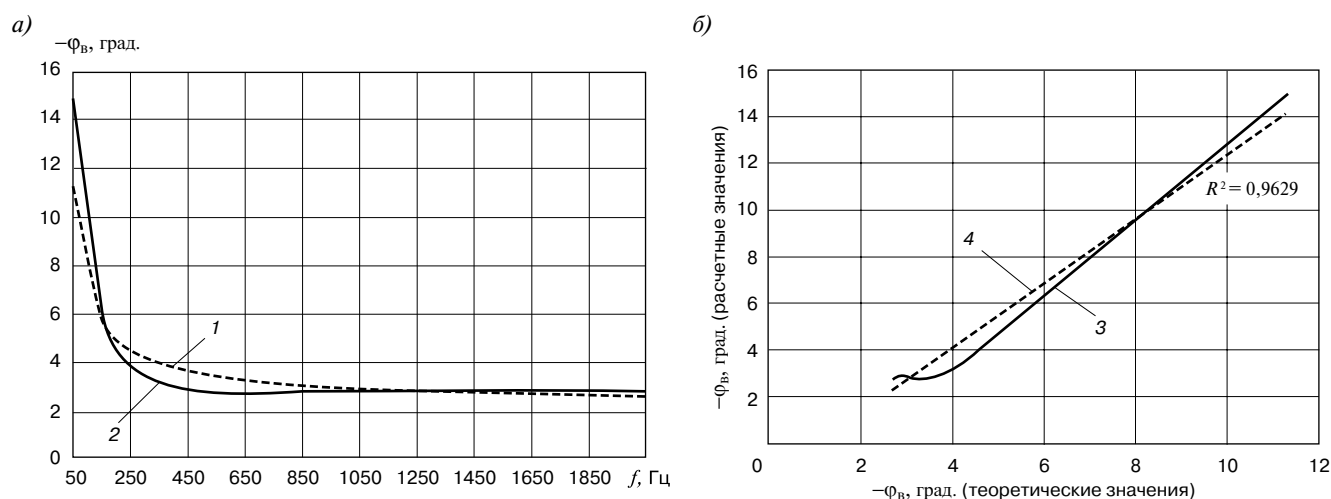


Рис. 13. Зависимость аргумента волнового сопротивления $-\phi_b$ от частоты колебаний f (а) и оценка сходимости теоретических и расчетных значений (б): 1 — теоретические значения; 2 — расчетные значения; 3 — зависимость расчетного значения $-\phi_b$ от теоретического при одинаковых частотах; 4 — линия тренда

Fig. 13. Dependence of the wave impedance argument $-\phi_b$ on the oscillation frequency f (a) and estimation of the convergence of theoretical and calculated values (b): 1 — theoretical values; 2 — calculated values; 3 — dependence of the calculated value $-\phi_b$ on the theoretical value at the same frequencies; 4 — trend line

коэффициента детерминации свидетельствуют о высоком уровне сходимости расчетных и теоретических данных. Следовательно, разработанная модель контактной сети для оценки до- и послекоммутационных процессов адекватна контактной подвеске ПБСМ-95 + МФ-100.

Заключение. В результате проведенного исследования установлено, что в рассмотренном частном случае повышение коэффициента мощности электровоза возможно за счет уменьшения минимального угла открытия тиристоров α_0 . Оно зависит от изменения структуры преобразователя и от его зоны регулирования. При этом расчеты на имитационной модели «контактная

сеть — электровоз» показали, что по сравнению со штатной схемой электровоза, где минимальный угол открытия тиристоров $\alpha_0 = 9^\circ$ эл., уменьшение угла α_0 до $4,5^\circ$ эл. приводит к почти двукратному уменьшению амплитуды докоммутационных колебаний напряжения и небольшому уменьшению амплитуды послекоммутационных колебаний напряжения.

Для повышения устойчивости работы системы управления электровоза предложено устройство формирования минимальных углов открытия тиристоров. Применение данного устройства позволит обеспечить работу узла формирования угла α_0 при искажениях формы сетевого напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 55364–2012. Электровозы. Общие технические требования: национальный стандарт Российской Федерации: введен 1 января 2014 г. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.
2. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Дроголов Д. Ю. Повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока за счет изменения структуры преобразователя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 2. С. 47–52.
3. Шухарев С. А., Дроголов Д. Ю. Повышение энергетических показателей многозонных преобразователей // Практическая силовая электроника. 2019. № 3. С. 41–46.
4. Преобразователь однофазно-постоянного тока: пат. 2706422 Рос. Федерация: МПК H02M 7/162 / Ю. М. Кулинич [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ДВГУПС. № 2019104817; заявл. 20.02.2019; опубл. 19.11.2019, Бюл. № 32.
5. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М.: Транспорт, 1988. 311 с.
6. Кучумов В. А., Широченко Н. Н. Электромагнитные процессы в тяговой сети с распределенной емкостью при коммутации тока в преобразователе электроподвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. 1984. № 1. С. 19–23.
7. Кучумов В. А., Широченко Н. Н. Электромагнитные процессы в тяговой сети с распределенной емкостью при выпрямлении тока в преобразователе электроподвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. 1984. № 8. С. 23–27.
8. Способ фазового управления тиристорными преобразователями, одновременно работающими на индивидуальные нагрузки: пат. 462261 СССР: МПК H02M 7/53846 / Б. Н. Тихменев, И. Н. Фроленков; заявитель и патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. № 1663300; заявл. 27.05.1971; опубл. 28.02.1975, Бюл. № 8.
9. Кулинич Ю. М., Дроголов Д. Ю. Устройства управления преобразователем электровоза переменного тока при искажениях питающего напряжения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 4. С. 16–20.
10. Формирователь синхронизирующих импульсов: пат. 2183378 Рос. Федерация: МПК H02M 1/08, H03K 5/1536 / Ю. М. Кулинич, А. Н. Савоськин; заявитель и патентообладатель ООО «ЭЛМЕХтрансА». № 2001102269; заявл. 26.01.2001; опубл. 10.06.2002, Бюл. № 16.

11. Устройство для формирования минимальных углов управления: пат. 2709026 Рос. Федерация: МПК H02M 1/08 / Ю. М. Кулинич [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ДВГУПС. № 2019112666; заявл. 25.04.2019; опубл. 13.12.2019, Бюл. № 35.
12. Власьевский С. В., Скорик В. Г. Снижение коммутационных и послекоммутационных колебаний напряжения в контактной сети при работе электровозов переменного тока // Вестник Всерос. науч.-исслед. и проектно-конструкторского ин-та электровозостроения. 2006. № 3. С. 84–89.
13. Савоськин А. Н., Кулинич Ю. М., Алексеев А. С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть — электровоз» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35.
14. Испытания электровоза ВЛ85 с разнофазным управлением выпрямительно-инверторными преобразователями / Ю. М. Кулинич [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 1986. № 4. С. 23–26.
15. Конников И. А. Схемотехническое моделирование линии с распределенными параметрами // Электричество. 2009. № 3. С. 50–53.
16. Ермоленко Д. В. Повышение электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения с тиристорным электроподвижным составом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Всесоюз. НИИ ж.-д. транспорта. М., 1991. 22 с.
17. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде MatLab-Simulink. СПб.: Лань, 2013. 443 с.
18. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. М.: УМК МПС, 2002. 638 с.
19. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЛИНИЧ Юрий Михайлович,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО ДВГУПС

ДРОГОЛОВ Денис Юрьевич,
аспирант, преподаватель,
кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО ДВГУПС

Статья поступила в редакцию 28.01.2020 г., актуализирована 18.03.2020 г., принята к публикации 25.03.2020 г.

Для цитирования: Кулинич Ю. М., Дроголов Д. Ю. Исследование электромагнитных процессов в системе «контактная сеть — электровоз» при уменьшении минимального угла открытия тиристорov в выпрямительно-инверторном преобразователе // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 2. С. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-93-102>.

Study of electromagnetic processes in the system “contact network — electric locomotive” while reducing the minimum opening angle of the thyristors in the rectifier-inverter converter

Yu. M. KULINICH, D. Yu. DROGOLOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Far Eastern State University of Railway Engineering” (FGBOU VO DVGUPS), Khabarovsk, 680021, Russia

Abstract. A new method is proposed for increasing the power factor of an electric locomotive by changing the minimum opening angle of thyristors α_0 of a rectifier-inverter converter. The decrease in the angle α_0 is due to changes in both the structure of the transducer and the zone of its regulation. A pulse synchronization device has been developed that makes it possible to generate pulses with

strong distortions of the mains voltage U_c at the points of natural transition of the voltage of the fundamental frequency U_c through the zero line. Based on this device, an α_0 pulse-forming device was developed that eliminates the influence of pre- and post-switching voltage fluctuations. A “contact network — electric locomotive” model was created in the environment of MatLab/Simulink, taking

into account the nonlinearity of the longitudinal parameters of the contact network. The effect of decreasing the angle α_0 on the character of pre- and post-switching voltage fluctuations was analyzed, and the parameters of transient processes were calculated. Particular attention was paid to modeling the parameters of traction network. The primary network parameters adopted in the model correspond to theoretical parameters for the selected type of contact suspension. Their high convergence is confirmed by the calculation of the coefficient of determination R^2 . Calculations on the “contact network — electric locomotive” model show that compared with the standard scheme of the electric locomotive, where the minimum opening angle of the thyristors is $\alpha_0 = 9^\circ$ el., the decrease in the angle α_0 to 4.5° el. leads to an almost twofold decrease in the amplitude of pre-switching voltage fluctuations and a small decrease in the amplitude of post-switching voltage fluctuations. The model results indicate that a decrease in the minimum thyristor opening angle α_0 leads to an increase in the power factor of the electric locomotive.

Keywords: electric locomotive; contact network; simulation model; MatLab/Simulink; nonlinear distributed parameters; power factor

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-93-102>

REFERENCES

1. GOST R 55364–2012. *Electric locomotives. General technical requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 36 p. (in Russ.).
2. Kulnich Yu. M., Shukharev S. A., Drogolov D. Yu. *Povyshenie koeffitsienta moshchnosti elektrovoza peremennogo toka za schet izmeneniya struktury preobrazovatelya* [Increasing the power factor of an AC electric locomotive by changing the structure of the converter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of Higher Education Institutions. Electromechanics], 2019, Vol. 62, no. 2, pp. 47–52.
3. Shukharev S. A., Drogolov D. Yu. *Povyshenie energicheskikh pokazateley mnogozonnykh preobrazovatelye* [Improving the energy performance of multi-zone converters]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics], 2019, no. 3, pp. 41–46.
4. Kulnich Yu. M., Drogolov D. Yu., Shukharev S. A. *Converter single-phase direct current*. Pat. No. 2706422: MPK H02M 7/162; published on 19.11.2019, Bull. 32 (in Russ.).
5. Tikhmenev B. N., Kuchumov V. A. *Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami* [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow, Transport Publ., 1988, 311 p.
6. Kuchumov V. A., Shirochenko N. N. *Elektromagnitnye protsessy v tyagovoy seti s rasprelennoy emkost'yu pri kommutatsii toka v preobrazovatele elektropodvizhnogo sostava* [Electromagnetic processes in a traction network with distributed capacity when switching current in a converter of electric rolling stock]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1984, no. 1, pp. 19–23.
7. Kuchumov V. A., Shirochenko N. N. *Elektromagnitnye protsessy v tyagovoy seti s rasprelennoy emkost'yu pri vypryamlenii toka v preobrazovatele elektropodvizhnogo sostava* [Electromagnetic processes in a traction network with distributed capacity when rectifying the current in an electric rolling stock converter]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1984, no. 8, pp. 23–27.
8. Tikhmenev B. N., Frolenkov I. N. *Method of phase control of thyristor converters, simultaneously working on individual loads*.

Pat. No. 462261: MPK H02M 7/53846; published on 28.02.1975, Bull. 8 (in Russ.).

9. Kulnich Yu. M., Drogolov D. Yu. *Ustroystva upravleniya preobrazovatelem elektrovoza peremennogo toka pri iskazheniyakh pitayushchego napryazheniya* [Control devices for the converter of an alternating current electric locomotive with distortion of the supply voltage]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2019, no. 4, pp. 16–20.

10. Kulnich Yu. M., Savos'kin A. N. *Shaper of synchronizing pulses*. Pat. No. 2183378: MPK H02M 1/08, H03K 5/1536; published on 10.06.2002, Bull. 16 (in Russ.).

11. Kulnich Yu. M., Drogolov D. Yu., Shukharev S. A. *Device for forming minimal control angles*. Pat. No. 2709026: MPK H02M 1/08; published on 13.12.2019, Bull. 35 (in Russ.).

12. Vlas'evskiy S. V., Skorik V. G. *Reducing switching and post-switching voltage fluctuations in the contact network during the operation of AC electric locomotives*. Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive, 2006, no. 3, pp. 84–89.

13. Savos'kin A. N., Kulnich Yu. M., Alekseev A. S. *Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoy sisteme "kontaktnaya set'—elektrovoz"* [Mathematical modeling of electromagnetic processes in the dynamic system “contact network — electric locomotive”]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2002, no. 2, pp. 29–35.

14. Kulnich Yu. M., Nakhodkin V. V., Shirochenko N. N., Kuchumov V. A., Shtiben G. A. *Tests of an electric locomotive VL85 with different-phase control of rectifier-inverter converters*. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 1986, no. 4, pp. 23–26.

15. Konnikov I. A. *Skhemotekhnicheskoe modelirovanie linii s rasprelennymi parametrami* [Schematic modeling of a line with distributed parameters]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2009, no. 3, pp. 50–53.

16. Ermolenko D. V. *Povyshenie elektromagnitnoy sovmestimosti sistemy tyagovogo elektroobrazovaniya s tiristornym elektropodvizhnym sostavom. Kand. tekhn. nauk avtoref. diss.* [Improving the electromagnetic compatibility of the traction power supply system with thyristor electric rolling stock. Cand. tech. sci. diss. synopsis]. Moscow, 1991, 22 p.

17. German-Galkin S. G. *Virtual'nye laboratorii poluprovodnikovyykh sistem v srede MatLab-Simulink* [Virtual laboratories of semiconductor systems in the environment of MatLab-Simulink]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013, 443 p.

18. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovmestimost'* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, UMK MPS Publ., 2002, 638 p.

19. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996, 638 p.

ABOUT THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department “Railway transport”, FGBOU VO DVGUPS

Denis Yu. DROGOLOV,

Post-graduate, Teacher, Department “Railway transport”, FGBOU VO DVGUPS

Received 28.01.2020

Revised 18.03.2020

Accepted 25.03.2020

■ E-mail: kulinitich@rambler.ru (Yu. M. Kulnich)

For citation: Kulnich Yu. M., Drogolov D. Yu. Study of electromagnetic processes in the system “contact network — electric locomotive” while reducing the minimum opening angle of the thyristors in the rectifier-inverter converter. *Vestnik of the Railway Research Institute*. 2020. 79 (2): 93–102 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-93-102>.