УДК 621.33 DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-67-73

Повышение энергетической эффективности тягового электроснабжения переменного тока с силовыми многофункциональными вольтодобавочными трансформаторами

А. Б. КОСАРЕВ[1], Б. И. КОСАРЕВ[2]

[1] Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия
[2] Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МИИТ), Москва, 127994, Россия

Аннотация. Рассмотрены энергетические соотношения в системе тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока с включением в нее силового многофункционального вольтодобавочного трансформатора (МФ ВДТ), компенсационная обмотка которого подключена к компенсирующей установке. Учтено, что ток электровоза и напряжение на его токоприемнике носят несинусоидальный характер.

Анализ электромагнитных процессов выполнен при различных значениях емкости компенсирующей установки (УППРК), равных 1, 038, 1,75 и 1,94 мФ, что соответствует изменению реактивной мощности от 2,5 до 5 МВАр.

Показана целесообразность выбора и регулирования компенсирующей установки, подключенной к компенсационной обмотке МФ ВДТ, исходя из минимума обменной энергии, определяемой наличием в СТЭ емкостных и индуктивных накопителей энергии.

Установлено, что при работе электровоза ВЛ-80^{р} необходимая величина емкости определенной по критерию минимума обменной энергии на 0,2–0,3 мФ меньше емкости, рассчитанной согласно действующим нормативным документам.

Ключевые слова: тяговая сеть; электровоз; компенсирующая установка; многофункциональный вольтодобавочный трансформатор; активная и обменная энергии; несинусоидальный ток и напряжение

Введение. Непрерывный рост грузоперевозок, увеличение доли тяжеловесных и соединенных поездов, внедрение в эксплуатацию мощных электровозов на основных направлениях железных дорог требуют осуществления мероприятий по усилению и повышению эффективности работы системы тягового электроснабжения (СТЭ).

Проведенный анализ возможностей традиционных средств повышения напряжения в тяговой сети при повышенных тяговых нагрузках показал, что имеется потребность в создании нового, дополнительного средства усиления СТЭ, которое обладало бы не меньшими возможностями по повышению напряжения в тяговой сети, чем установки емкостной компенсации, но имело бы существенно большую надежность и лучшие эксплуатационные качества.

E-mail: kosarev.alexandr@vniizht.ru (А. Б. Косарев)

Таким средством может быть вольтодобавочный трансформатор, спроектированный с целью повышения напряжения на одной из фаз тяговой подстанции [1, 2].

Силовой однофазный двухобмоточный трансформатор для электрифицированных железных дорог переменного тока ОРМЖ-10000/27 имеет расщепленную обмотку низкого напряжения (НН). Эта обмотка состоит из двух секций — полуобмоток с номинальными напряжениями 2,5 кВ и номинальными токами 2000 А. Изоляция всех обмоток и всех выводов по отношению к земле выполнена на напряжение 27,5 кВ, что позволяет использовать указанный силовой трансформатор не только как понижающий для установок регулируемой поперечной емкостной компенсации, т. е. как вольтодобавочный, но и как многофункциональный вольтодобавочный трансформатор (МФ ВДТ) — комбинированное средство усиления системы тягового электроснабжения [3, 4, 5].

Одна из секций обмотки низкого напряжения с номинальным рабочим напряжением 2,5 кВ МФ ВДТ включается в рассечку плеча питания тяговой подстанции с наиболее низким напряжением (обычно это плечо питается от отстающей фазы силового тягового трансформатора) и выполняет роль вольтодобавочной обмотки (ВДО). ВДО может включаться и в рассечку другого — смежного плеча питания (с более высоким напряжением), если это диктуется другими требованиями, например требованиями первоочередного ограничения уравнительных токов на смежной фидерной зоне.

Вторая секция обмотки НН с таким же номинальным напряжением 2,5 кВ нагружается конденсаторной батареей. В качестве реакторов могут использоваться обычные реакторы для сетей 6–10 кВ. Мощность компенсирующей установки может достигать 4,5–5,0 МВАр. Эта установка может иметь несколько ступеней регулирования. Электрические характеристики МФ ВДТ известны и приведены в [1].

С помощью МФ ВДТ может одновременно осуществляться [1, 3, 5]:

– повышение напряжения на одной из рабочих фаз тяговой подстанции без изменения начальной фазы этого напряжения или с изменением его начальной фазы;

– ограничение уравнительных токов в тяговой сети, вызванных наличием как продольной, так и поперечной составляющих разности напряжения на шинах соседних тяговых подстанций, осуществляющих двухстороннее питание фидерной зоны;

– повышение коэффициента мощности электрифицированного участка путем компенсации реактивной мощности электроподвижного состава;

– уменьшение потери электрической энергии в тяговой сети за счет уменьшения уравнительного тока и рабочих токов электроподвижного состава, а также уменьшение потери электрической энергии в тяговых трансформаторах и в линии внешнего электроснабжения в первую очередь за счет уменьшения реактивных токов в них;

– повышение качества электрической энергии за счет включения ВДО в отсасывающую линию тяговой подстанции.

Особенностью работы СТЭ, в том числе и с МФ ВДТ, является то, что электроподвижной состав генерирует в тяговую сеть ток, носящий несинусоидальный характер.

Компенсирующие установки, выбор их параметров.

В настоящее время для устранения этих отрицательных эффектов применяют емкостные компенсирующие установки, некоторые из которых одновременно выполняют фильтрацию гармоник тягового тока [6, 7]. При этом в связи с постоянным изменением тяговых нагрузок наиболее перспективными являются регулируемые установки поперечной емкостной компенсации (УППК) [7]. Известны способы автоматического регулирования мощности УППК. Однако ни один из них не обеспечивает рационального режима работы компенсирующей установки (КУ), не позволяет полностью исключить обмен энергией между потребителем и источником электрической энергии. Для эффективной работы КУ выбор ее параметров должен определяться в первую очередь энергетическими свойствами и характеристиками приемника энергии [8].

Процесс преобразования электрической энергии в замкнутом объеме, не имеющем энергообмена с внешней средой, согласно теореме Умова — Пойтинга определяется соотношением [8]

$$\int_v \bar{\delta}\bar{E}_{\text{стор1}}dV = \int_v \bar{\delta}\left(\bar{E}+\bar{E}_{\text{стор2}}\right)dV + \\ + \int_v \left(\bar{H}\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}+\bar{E}\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right)dV, \quad (1)$$

где δ — плотность тока, $\bar{E}$ — напряженность электрического поля; $\bar{E}_{\text{стор}}$ — напряженность электрического поля, вызванного действием сторонних сил в процессе преобразования некоторого вида энергии в электрическую $\left(\bar{E}_{\text{стор1}}\right)$ и в процессе перехода электрической энергии в энергию иного вида $\left(-\bar{E}_{\text{стор2}}\right)$; H — напряженность магнитного поля; B — магнитная индукция; D — электрическая индукция.

Интенсивность изменения энергии сторонних источников, обеспечивающих получение электрической энергии, определяется интегралом

$$\left(\int_v \bar{\delta}\bar{E}_{\text{стор1}}dV\right).$$

Интенсивность процесса необратимого потребления, т. е. процесса превращения электрической энергии в другой вид энергии, рассчитывается из соотношения

$$\left(\int_v \left(\bar{E}+\bar{E}_{\text{стор2}}\right)dV\right),$$

и, например, для случая преобразования электрической энергии в тепловую выражается через мгновенную активную мощность

$$p(t)=\sum\nolimits_1^n i_k^2 r_k \text{ или } p(t)=\sum\nolimits_1^n u_k^2 g_k, \quad (2)$$

где r — параметр, называемый мгновенным активным сопротивлением потребителя; $g=1/r$ — мгновенная активная проводимость потребителя; i, u — ток и напряжение k-го потребителя.

Второй интеграл правой части уравнения (1), записанный для электрической цепи, содержащей накопители потокосцепления ψ магнитного поля и накопители заряда Q электрического поля, показывает, что мгновенная мощность цепи

$$q=\sum\nolimits_1^n\left[i_{L_k}\frac{d\psi_k}{dt}+U_{C_k}\frac{d\varphi_k}{dt}\right] \text{ или}$$

$$q=\sum\nolimits_1^n\left[L_k i_{L_k}\frac{di_{L_k}}{dt}+C_k U_{C_k}\frac{du_{C_k}}{dt}\right],$$

где φ_k — потенциал k-го потребителя;

$$L_k=\frac{\varphi_k}{i_{L_k}};\ C_k=\frac{Q_k}{U_{C_k}}$$

характеризует интенсивность изменения энергии, временно запасаемой в индуктивном и емкостном накопителях, и представляет мгновенную мощность обменных энергетических процессов в рассматриваемой системе.

Обменная мощность увеличивает потерю активной мощности и вызывает дополнительные потери напряжения в тяговой сети, т. е. снижает эффективность работы системы тягового электроснабжения [4].

Выбор параметров КУ, в частности установок регулируемой поперечной компенсации, осуществляется в основном по величине $\cos\varphi$ на основной гармонике [6, 7], что в условиях несинусоидального характера токов в СТЭ может привести к неконтролируемым погрешностям.

Естественно, что обобщенный показатель выбора и регулирования КУ может быть получен лишь по результатам анализа энергетических соотношений в СТЭ при учете несинусоидального характера токов, генерируемых электроподвижным составом (ЭПС).

Разложение мгновенной полной мощности $s(t)$ на мгновенную активную $p = p(t)$ и мгновенную обменную мощность $q = q(t)$ позволяет достаточно строго оценить энергетическую целесообразность работы различных электрических цепей с помощью отношения

$$K_n = \frac{W_0}{W_0 + W_\sim}, \qquad (3)$$

где $W_0 = \int_0^\tau p dt$ — энергия, потребляемая участком цепи за определенный промежуток времени, $W_\sim = \int_0^\tau q dt$ — энергия, соответствующая обменному процессу на этом участке за тот же промежуток времени, K_n — коэффициент энергетической эффективности.

Указанный критерий выбора и регулирования КУ, подключенной к компенсационной обмотке МФ ВДТ, целесообразно использовать при отсутствии в СТЭ фильтр-компенсирующих устройств.

При выполнении КУ с функцией уменьшения коэффициента искажения тока тяговой подстанции (за счет внедрения фильтр-компенсирующих устройств), целесообразно использовать критерии выбора и регулирования КУ, определяемые из соотношения

$$K_э = \frac{I_н}{I_л},$$

где $I_н$, $I_л$ — действующие значения тока на участке после и до места установки МФ ВДТ соответственно.

Коэффициент $K_э$ можно назвать коэффициентом эффективности компенсирующей установки. Однако следует учитывать, что данный коэффициент, оценивающий работу УППК, стремится к единице при величине емкости, близкой к нулю.

В тоже время при $C = 0$ УППК МФ ВДТ, что соответствует работе МФ ВДТ в режиме ВДТ, коэффициент K_I будет равен

$$K_I = \frac{W_1}{W_1 + W_2},$$

где W_1, W_2 — количество витков первичной и вольтодобавочной обмоток МФ ВДТ.

Следовательно, для того чтобы коэффициенты эффективности использования УППК и МФ ВДТ при отсутствии компенсации реактивной мощности были равны единице, необходимо коэффициент эффективности использования многофункционального силового трансформатора определять по формуле

$$K_э^* = \frac{I_н}{I_л}\left(\frac{W_1}{W_1 + W_2}\right).$$

Математическое моделирование и алгоритм расчета электромагнитных процессов. При рассмотрении энергетических процессов в СТЭ с МФ ВДТ потребовалось решение задач моделирования процессов, происходящих в реальных сетях. Использование компьютерного моделирования для этих целей позволяет максимально приблизить создаваемые модели к реальным условиям эксплуатации и выдавать практические рекомендации для улучшения энергетических соотношений в СТЭ при работе современного электроподвижного состава.

На рис. 1 представлена схема замещения СТЭ с МФ ВДТ, где $L_{СЭ}$, $R_{СЭ}$ — индуктивность и активное сопротивление СВЭ, трансформаторов тяговой подстанции; L_{ia}, R_{ia} — индуктивность и активное сопротивление i-ой обмотки МФ ВДТ; $C_К$ — емкость КУ; $L_К$, $R_К$ — индуктивность и активное сопротивление реактора; L_i, R_i — индуктивность и активное сопротивление четырехполюсника, моделирующего тяговую сеть; C_0, g_0 — емкость и поперечная проводимость контактной сети относительно земли; $L_{iТ}$, $R_{iТ}$ — индуктивность и активное сопротивление тягового трансформатора электровоза; M_{ij} — взаимная индуктивность между обмотками трансформатора электровоза; $L_Ш$, $L_{Вi}$, $L_Д$, $R_Д$, $R_Ш$, R, $R_{Вх}$ — индуктивности и активные сопротивления двигателя с последовательным возбуждением; $E_Д$ — противо-ЭДС якорной цепи.

По алгоритму расчета электромагнитных процессов в СТЭ с МФ ВДТ [3] при работе электровоза ВЛ-80^р, находящегося на расстоянии 10 км от тяговой подстанции (участок однопутный, питание одностороннее), определились мгновенные значения токов $i_н$ и $i_л$, мгновенные значения напряжений питающих линий относительно земли до и после установки МФ ВДТ.

Используя известный метод разложения мгновенной мощности [4], определялись мгновенные значения активной и обменной мощности. Результаты расчетов действующего значения тока на вводе тяговой подстанции от потребляемой электровозом активной мощности и емкости КУ, подключенной к КО МФ ВДТ, представлены в табл. 1.

На рис. 2 приведены зависимости действующих значений тока тяговой подстанции $I_л$ и коэффициента эффективности в функции тока $I_н$ для электровоза ВЛ-80^р.

Анализ зависимостей $K_э^* = f(I_н)$ показывает, что емкость УППРК существенно определяет характер

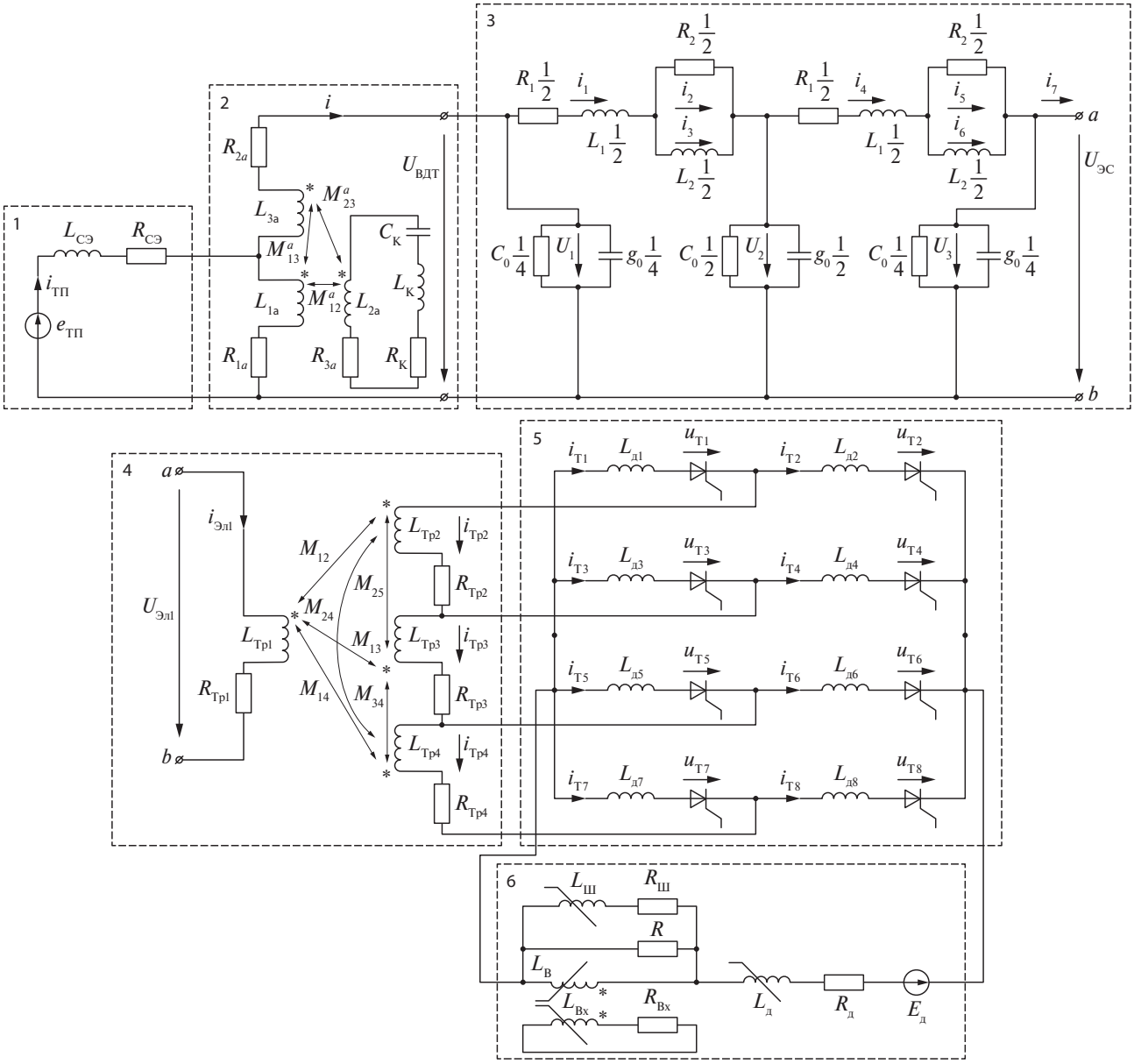

Рис. 1 . Схема замещения СТЭ с МФ ВДТ и преобразовательным электровозом:
1 — схема замещения системы внешнего электроснабжения и силового трансформатора; *2* — МФ ВДТ;
3 — тяговая сеть; *4* — трансформатор электровоза; *5* — ВИП; *6* — тяговый двигатель с последовательным возбуждением

Fig. 1 . Scheme of replacement of TES with MF BT and converter electric locomotive:
1 — scheme of substitution of the external power supply system and power transformer; *2* — MF BT; *3* — traction network;
4 — electric locomotive transformer; *5* — SPS; *6* — traction motor with series excitation

изменения $K^*_э$. Чем больше емкость, тем при больших значениях тока электровоза коэффициент $K^*_э$ достигает своего максимума. При одном и том же значении $I_н$ ток в линии, а следовательно потери напряжения и энергии тем меньше, чем больше емкость УППРК. Эта закономерность относится только для области изменения $I_н$, где $K^*_э \geq 1$. Из данных, приведенных на рис. 2, следует, что при $C = 1{,}94 \cdot 10^{-3}$ Ф коэффициент $K^*_э \geq 1$ при $I_н \geq 145A$ для ВЛ-80р.

Результаты расчетов коэффициента мощности $\lambda_ш$ на шинах тяговой подстанции в зависимости от активной мощности электровоза ($P_э$), потребляемой электроподвижным составом, приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Анализ электромагнитных процессов выполнен при различных значениях емкости УППРК, равных 1,038, 1,75 и 1,94 мФ, что соответствует изменению реактивной мощности от 2,5 до 5 МВАр. Помимо этого, были произведены расчеты для значения $C = 0$, т. е.

при работе МФ ВДТ в режиме ВДТ, а также при отсутствии средств усиления и при использовании вместо МФ ВДТ УППК с емкостью $C = 17 \cdot 10^{-6}$ Ф, что соответствует мощности КУ МФ ВДТ при $C = 1{,}94 \cdot 10^{-3}$ Ф.

Увеличение потребляемой электровозом активной мощности требует соответствующего увеличения мощности УППРК и емкости КУ, подключенной к КО МФ ВДТ. Так, например, при $C = 1{,}038 \cdot 10^{-3}$ Ф полная компенсация обеспечивается при $P_э = 2{,}75$ МВт, а при $C = 1{,}94 \cdot 10^{-3}$ Ф — при $P_э = 4{,}45$ МВт. Этот фактор дополнительно иллюстрирует потребность в регулировании мощности компенсирующей установки.

Вырабатывая реактивную мощность, МФ ВДТ уменьшает потерю напряжения в питающей системе электроснабжения за счет уменьшения первичного тока. В то же время вследствие эффектов вольтодобавки и продольной емкостной компенсации МФ ВДТ повышает напряжение в тяговой сети и, соответственно, увеличивает уровень напряжения на токоприемнике электровоза.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента мощности тяговой подстанции и $\cos\varphi_1$ от тока $I_н$ при различных значениях емкости УППРК МФ ВДТ ($C = 1{,}038$ мФ — кривая 1; 1,75 мФ — кривая 2; 1,94 мФ — кривая 3).

Из анализа зависимости $\lambda_ш = f(P_э)$ при фиксированном значении емкости следует, что наименьшее значение $\lambda_ш$ достигается при $C = 0$. С увеличением емкости максимальное значение $\lambda_ш$ возрастает и достигается оно при больших значениях $P_э$. Увеличение нагрузки требует соответствующего увеличения мощности УППРК.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что максимумы $\lambda_ш$ достигаются при тех же значениях $I_н$, что и максимумы $K_э^*$ при условии одинаковой емкости УППРК. Сравнение функций $\cos\varphi_1(I_н)$ с кривыми $\lambda_ш = f(I_н)$ и $K_э^*(I_н)$ позволило определить, что экстремумы функции $\cos\varphi_1(I_н)$ находятся в области меньших значений $I_н$, чем экстремумы функции $\lambda_ш = f(I_н)$ и $K_э^* = f(I_н)$. В результате анализа приведенных выше критериев интегральных характеристик получены зависимости требуемых величин емкости УППРК МФ ВДТ в функции тока $I_н$ при выполнении условий $K_э^* = \max$ и $\cos\varphi_1 = 1$.

Установлено, что для обеспечения оптимального режима работы системы «первичное электроснабжение МФ ВДТ — тяговая сеть — преобразовательный электровоз» необходимо выбирать емкость УППРК МФ ВДТ по зависимостям $C = f_1(I_н)$ при $K_э^* = \max$, а не по зависимостям $C = f_2(I_н)$ при $\cos\varphi_1 = 1$.

В первом случае при одинаковом токе нагрузки ток в цепи до места установки МФ ВДТ будет меньше, чем при выборе емкости УППРК МФ ВДТ по закону $C = f_2(I_н)$. Следовательно, при использовании зависимости $C = f_1(I_н)$ потери энергии и напряжения в питающей сети будут меньше, чем при выборе емкости УППРК по зависимости $C = f_2(I_н)$.

Как показали расчеты, при работе электровоза ВЛ-80^р необходимая величина емкости по предлагае-

Таблица 1

Действующее значение тока на шинах тяговой подстанции в зависимости от потребляемой электровозом активной мощности и емкости компенсирующей установки МФ ВДТ

Table 1

The actual value of the effective current on the buses of the traction substation, depending on the active power consumed by the locomotive and the capacity of the compensating unit of the MF BT

Емкость КУ, C, мФ	Активная мощность электровоза, $P_э$, МВт						
	2,2	2,75	3,3	3,85	4,4	4,95	5,5
1,038	116	141	172	212	266	340	443
1,725	119	134	155	185	229	292	381
1,940	126	137	153	175	209	260	338

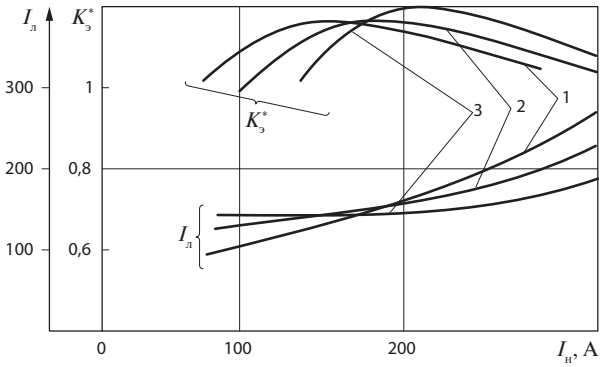

Рис. 2. Зависимость действующих значений токов в питающей линии и коэффициента эффективности от тока электровоза (C = 1,038 мФ — кривая 1; 1,75 мФ — кривая 2; 1,94 мФ — кривая 3)
Fig. 2. The dependence of the actual values of the currents in the supply line and the efficiency coefficient on the electric locomotive current (C = 1.038 mF — curve 1; 1.75 mF — curve 2; 1.94 mF — curve 3)

Таблица 2

Коэффициент мощности $\lambda_ш$ на шинах тяговой подстанции в зависимости от активной мощности электровоза и емкости КУ, подключенной к КО МФ ВДТ

Table 2

Coefficient of power on the buses of the traction substation depending on the active capacity of the locomotive and the capacity of the CU connected to the CW of the MF BT

Емкость КУ, C, мФ	Активная мощность электровоза, $P_э$, МВт						
	2,2	2,75	3,3	3,85	4,4	4,95	5,5
1,038	0,854	0,894	0,898	0,865	0,796	0,691	0,55
1,725	0,665	0,807	0,897	0,936	0,926	0,869	0,765
1,940	0,431	0,647	0,803	0,901	0,938	0,916	0,835

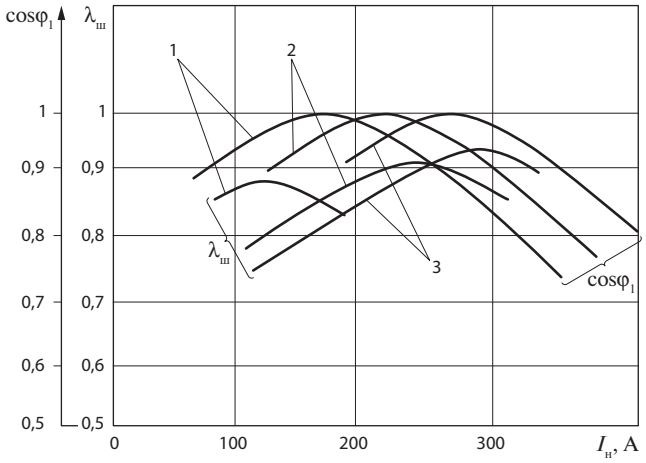

Рис. 3. Зависимость коэффициента мощности $\lambda_ш$ и $\cos\varphi_1$ на шинах тяговой подстанции от тока электровоза при различных значениях емкости УППРК МФ ВДТ: (C = 1,038 мФ — кривая 1; 1,75 мФ — кривая 2; 1,94 мФ — кривая 3)

Fig. 3. Dependence of the power factor $\lambda_ш$ and $\cos\varphi_1$ on the buses of the traction substation from the electric locomotive current having various values of the capacity of the USPPM MF BT: (C = 1.038 mF — curve 1; 1.75 mF — curve 2; 1.94 mF — curve 3)

мому критерию оказалась на 0,2–0,3 мФ меньше, чем емкость, рассчитанная по существующим критериям.

Таким образом, коэффициент эффективности компенсирующей установки позволяет с достаточно высокой точностью выбирать величину мощности УППРК МФ ВДТ для обеспечения оптимального режима работы системы тягового электроснабжения. При этом величина емкости, требуемой по критерию $K_э^* = \max$, в среднем на 15–20 % оказывается меньше емкости, определяемой с использованием критерия $\cos\varphi_1 = 1$, т. е. с использованием существующей методики выбора емкости компенсирующей установки.

Выводы. 1. Выполнен анализ результатов моделирования мгновенных значений токов и напряжений в системе тягового электроснабжения при работе электровоза в режиме тяги при наличии в СТЭ силового вольтодобавочного трансформатора, компенсационная обмотка которого подключена к компенсирующей установке.

2. Показана возможность выбора параметров компенсирующей установки, подключенной к компенсационной обмотке МФ ВДТ, исходя из минимума обменной энергии, имеющей место в цепях с несинусоидальными источниками и потребителями электроэнергии.

3. Подтверждена эффективность использования критерия, характеризующего обмен энергии, при выборе параметров компенсирующей установки компенсационной обмотки МФ ВДТ при его расположении на тяговой подстанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов С. П. Многофункциональный вольтодобавочный трансформатор // Транспорт: наука, техника, управление. 1994. № 5. С. 23–25.

2. Устройство электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока: авт. свед. 1654056 СССР: МПК B60M 3/02 / В. И. Болдырев [и др.]; Московский ин-т инж. ж.-д. транспорта. № 4686572; заяв. 26.04.1989; опубл. 07.06.1991. Бюл. № 21. 3 с.

3. Косарев Б. И., Сербиненко Д. В., Алексеенко М. В. Система тягового электроснабжения переменного тока с многофункциональными вольтодобавочными трансформаторами // Транспорт: наука, техника, управление. 2013. № 1. С. 13–18.

4. Косарев А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. М.: ИНТЕКСТ, 2004. 272 с.

5. Косарев А. Б., Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 348 с.

6. Герман Л. А., Серебряков А. С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: РОАТ, 2012. 211 с.

7. Влияние поперечной емкостной компенсации на электромагнитные процессы в тяговой сети переменного тока / Р. Р. Мамошин [и др.] // Электричество. 1984. № 5. С. 9–12.

8. Демирчян К. С. Реактивная или обменная мощность // Энергетика и транспорт. 1984. № 2. С. 66–72.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОСАРЕВ Александр Борисович,
д-р техн. наук, профессор, первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ»

КОСАРЕВ Борис Иванович,
заслуженный деятель науки России, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электроэнергетика транспорта», МГУПС (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 27.02.2016 г., принята к публикации 03.04.2017 г.

Energy efficiency improvement of traction energy of alternating current with power multifunctional booster transformers

A. B. KOSAREV[1], B. I. KOSAREV[2]

[1] Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia
[2] Moscow State University of Railway Engineering of Emperor Nicholay II (MIIT), Moscow, 127994, Russia

Abstract. Continuous growth of freight traffic, an increase in the share of heavy and connected trains, the commissioning of powerful electric locomotives on the main railways requires the implementation of measures to strengthen and improving efficiency of the traction energy system (TES).

The analysis of the possibilities of traditional means of increasing the voltage in the traction network with increased traction loads showed that there is a need to create a new, additional means of amplifying the TES, which would have no less potential to increase the voltage in the traction network than the capacitive

compensation equipment, but would have a more significant reliability and better performance.

This means can be a booster transformer designed to increase the voltage at one of the phases of the traction substation [1, 2].

The energy relationships in the traction energy system (TES) of alternating current are considered with the inclusion of a power multifunctional booster transformer (MF BT), the compensating winding of which is connected to the compensating unit. It is taken into account that the electric locomotive current and voltage on the susceptor are not sinusoidal in nature.

The analysis of electromagnetic processes is carried out at different values of the capacitance of the compensating device (UPPRK), equal to 1, 038 mF; 1.75 mF and 1.94 mF, which corresponds to a change in reactive power from 2.5 to 5 MVAr.

The article shows the expediency of selection and the adjustment of compensating unit connected to the compensating winding of the MF BT, proceeding from the minimum of the exchange energy determined by the presence in the TES of capacitive and inductive energy storage devices.

It is established that when a VL-80r electric locomotive operates, the required capacity, determined by the minimum exchange energy criterion, is 0.2 – 0.3 mF less than the capacity calculated according to the current regulatory documents.

The investigation includes the analysis of simulation results of instantaneous currents and voltages in the traction energy system when the locomotive is operated in traction mode when there is a power booster transformer in the TES, the compensation winding of which is connected to the compensating unit.

The article shows the possibility of selecting parameters of the balancing unit connected to the compensating winding of the MF BT, based on the minimum exchange energy that occurs in circuits with non-sinusoidal sources and consumers of electricity.

The efficiency of using the criterion characterizing the energy exchange was confirmed at choosing parameters of the compensating installation of the compensating winding of the MF BT at its location on the traction substation.

Keywords: traction network; electric locomotive; compensating unit; multifunctional booster transformer; active and changeable energy; non-sinusoidal current and voltage

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-67-73

REFERENCES

1. Vlasov S. P. *Mnogofunkcional'nyy vol'todobavochnyy transformator* [Multifunctional booster transformer]. Transport: Nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: Science, engineering, management]. Moscow, 1994, no. 5, pp. 23 – 25.

2. Boldyrev V. I., Vlasov S. P., Klyuchnikov S. V., Kosarev B. I. *Ustroystvo elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka: avt. sved. 1654056* [The structure of power supply of the electrified railways of an alternating current: author's certific.1654056]. Byulleten' Moskovskogo instituta inzhenerov transporta [Bulletin of the Moscow Institute of Transport Engineers], no. 21, 1991, 3 p.

3. Kosarev B. I., Serbinenko D. V., Alekseenko M. V. *Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s mnogofunktsional'nymi vol'todobavochnymi transformatorami* [The traction power system of alternating current with multifunctional booster transformers]. Transport: Nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: Science, engineering, management]. Moscow, 2013, no. 1, pp. 13 – 18.

4. Kosarev A. B. *Osnovy teorii elektromagnitnoy sovmestimosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka* [Fundamentals of the theory of electromagnetic compatibility of traction power supply systems of alternating current]. Moscow, Intext Publ., 2004, 272 p.

5. Kosarev A. B., Kosarev B. I., Serbinenko D. V. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh energosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Electromagnetic processes in power systems of railways of an alternating current]. Moscow, VMG-Print Publ., 2015, 348 p.

6. German L. A., Serebryakov A. S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoy kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Adjustable capacitive compensation unit in traction power systems of railways]. Moscow, ROAT Publ., 2012, 211 p.

7. Mamoshin R. R., Milyutin A. P., Frolov A. V., Shchurov A. I. *Vliyanie poperechnoy emkostnoy kompensatsii na elektromagnitnye protsessy v tyagovoy seti peremennogo toka* [Effect of transverse capacitive compensation on electromagnetic processes in an AC traction network]. Elektrichestvo [Electricity], 1984, no. 5, pp. 9 – 12.

8. Demirchyan K. S. *Reaktivnaya ili obmennaya moshchnost'* [Reactive or exchange capacity]. Ekonomika i transport [Economics and transport], 1984, no. 2, pp. 66 – 72.

ABOUT THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV,
Dr. Sci.(Eng.), Professor, Deputy General Director,
JSC "VNIIZhT"

Boris I. KOSAREV,
Honored Scientist of Russia, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Department "Transport electroenergy", MGUPS (MIIT)

E-mail: kosarev.alexandr@vniizht.ru (A. B. Kosarev)

Received 27.02.2016
Accepted 03.04.2017

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Косарев А. Б., Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 349 с.

Изложены методы анализа электромагнитных процессов в современных системах тягового электроснабжения и их влияние на электроустановки и электрические сети магистральных железных дорог. Обоснованы методы расчета нестационарных, в том числе и грозовых, режимов в сложных и неоднородных нелинейных цепях с переменной структурой, при предоставлении элементов цепи в виде линий с распределенными параметрами, носящими вероятностный характер. С привлечением методов линейной алгебры и теории многополюсников рассмотрены матричные методы анализа энергетических соотношений в современных системах тягового электроснабжения при учете несинусоидального характера токов электровозов. Основные технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения защищены авторскими свидетельствами и патентами на полезную модель.

Книга предназначена для научных работников, аспирантов. Может быть полезна инженерам-электрикам, а также студентам электротехнических специальностей высших транспортных учебных заведений.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел.

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.