

# Вольтодобавочный трансформатор: компенсация недостатков в тяговой сети



Станислав ВЛАСОВ

Stanislav P.VLASOV

**Показаны возможности вольтодобавочного трансформатора по компенсации специфических недостатков распространённой в России системы тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока 25 кВ. В частности, способы нейтрализации отрицательного эффекта отстающей фазы и предрасположенность СТЭ к протеканию уравнивающего тока, особенно при наличии установок продольной ёмкостной компенсации в отстающей фазе тяговой подстанции. Расчётами и примерами использования вольтодобавочного трансформатора обосновывается уникальность устройства и его назначения.**

*Ключевые слова:* железная дорога, система тягового электроснабжения, электровоз, тяговая подстанция, вольтодобавочный трансформатор, напряжение в тяговой сети, вольтодобавочная обмотка, первичная питающая обмотка, уравнивающий ток и его ограничение.

*Власов Станислав Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

**Н**а железных дорогах России, электрифицированных по системе переменного тока напряжением 25 кВ, питание тяговой сети осуществляется от трёхфазных трансформаторов со схемой соединения высоковольтной и тяговой обмоток звезда-треугольник [1]. Эта система тягового электроснабжения (СТЭ) проста, удобна в эксплуатации; она обладает и другими достоинствами. Однако у нее есть недостатки и особенности, которые при значительных тяговых нагрузках могут снижать эффективность системы.

## I.

К отрицательным особенностям подобных СТЭ относится прежде всего несимметричный режим работы трёхфазных тяговых трансформаторов на двухплечевую тяговую нагрузку. Уровень напряжения на так называемой отстающей фазе тяговой подстанции оказывается более низким, чем на других фазах (при одинаковых нагрузках плеч питания подстанции). Разница напряжений может достигнуть 1,5–2,0 кВ при токах плеч питания 600 А. Оказывается пониженным и общий уровень напряжения в тяговой сети, преимущественно в межподстанционных зонах, питаемых от отстающих

**Таблица 1**

1,25 кВ	2500кВ · А
2,5 кВ	5000кВ · А
3,75 кВ	7500кВ · А
5,0 кВ	10000 кВ · А

фаз соседних тяговых подстанций. Такой режим работы сопровождается повышенными потерями энергии в системе электроснабжения.

При пониженном напряжении снижается эффективность установок поперечной ёмкостной компенсации.

Несимметрия напряжений тяговой подстанции на стороне 27,5 кВ отрицательно сказывается на условиях работы трёхфазных потребителей системы «два провода — рельс» (ДПР).

СТЭ 25 кВ предрасположена к протеканию уравнивающего тока, обусловленного наличием как продольной, так и поперечной составляющих разности напряжений на шинах соседних тяговых подстанций. Протекание уравнивающего тока вызывает дополнительные непроизводительные потери электроэнергии и может привести к другим нежелательным и, более того, вредным последствиям.

Интенсивность проявления специфических особенностей СТЭ 25 кВ возрастает при увеличении тяговых нагрузок и может быть причиной ограничения пропускной и провозной способностей ряда участков железной дороги. К таким относятся в первую очередь участки с тяжёлым профилем пути, получающие питание от отстающих фаз соседних тяговых подстанций.

Однако оптимизация напряжения в тяговой сети, улучшение энергетических показателей и повышение эффективности СТЭ 25 кВ требуются и на других участках, работающих не в столь экстремальных условиях.

Для устранения специфических отрицательных особенностей СТЭ переменного тока необходимо повышение напряжения на отстающей фазе тяговой подстанции, его выравнивание по величине с напряжением на других фазах подстанции, а также выравнивание как по величине, так и по фазе с напряжением на соответствующем плече соседней подстанции. То есть

налицо потребность в осуществлении избирательного, пофазного продольно-поперечного регулирования напряжения на тяговой подстанции.

## II.

В 1979–1991 годах кафедрой «Теоретические основы электромеханики» МИИТ был выполнен цикл исследований по усилению СТЭ участков Красноярской железной дороги. В результате совместного с железнодорожниками научного поиска родился способ усиления СТЭ переменного тока 25 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов [2]. По заказу МПС специальным проектно-конструкторским бюро СВПО «Трансформатор» (г. Тольятти) разработан унифицированный двухобмоточный трансформатор для электрифицированных железных дорог переменного тока ОРМЖ-10000/27. Он использовался в качестве вольтодобавочного (ВДТ), его функцией стал перевод установок поперечной ёмкостной компенсации (УППК) с напряжения 25,0 кВ на напряжение 2,5 кВ (предложение проф. Р. Р. Мамошина). В 1989 году была выпущена опытная партия этих трансформаторов. Один из них на следующий год установлен и включён в работу на тяговой подстанции Тяжин Красноярской железной дороги [3].

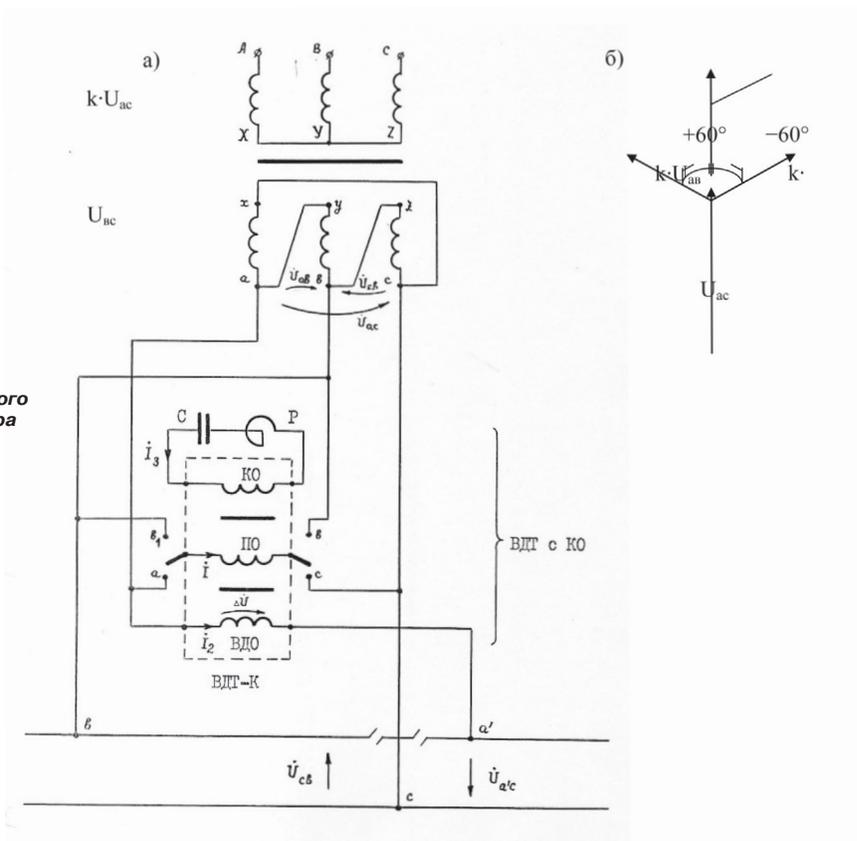
Трансформатор ОРМЖ-10000/27 — однофазный двухобмоточный [4]. Обмотка ВН выполнена на напряжение 27,5 кВ, её номинальная мощность 10000 кВ·А. Обмотка НН состоит из двух самостоятельных секций с номинальным напряжением по 2,5 кВ. Одна из них имеет дополнительное обветвление от середины секции. При работе ВДТ возможны соотношения напряжений и мощностей обмотки НН, показанные в таблице 1 [4,5].

Мощность потерь холостого хода трансформатора — 10 кВт, потерь короткого замыкания — 50 кВт. Напряжение короткого замыкания — 5%, ток холостого хода — 0,6%. Поперечная изоляция всех обмоток и изоляция всех вводов трансформатора рассчитаны на номинальное напряжение 27,5 кВ.

На рис. 1а приведена одна из возможных схем включения трансформатора ОРМЖ-10000/27 в качестве ВДТ в СТЭ участка.



Рис. 1. Схема включения вольтодобавочного трансформатора в СТЭ.



Для повышения напряжения на отстающей фазе тяговой подстанции (ТП) и его выравнивания на концах межподстанционной зоны (МПЗ) по модулю и фазе с целью повышения напряжения в тяговой сети до номинального уровня 25 кВ и уменьшения потерь энергии от уравнительного тока вольтодобавочная обмотка (ВДО) включается в рассечку плеча питания ТП, имеющего наиболее низкое напряжение. Такой точкой включения обычно является плечо, питаемое отстающей фазой тягового трансформатора (ТТ). На рис. 1а обмотка соединена с рассечкой фидера отстающей фазы. Таким образом, напряжение ВДО  $\Delta U$  добавляется к напряжению отстающей фазы ТТ  $U_{ac}$ , и напряжение в тяговой сети составляет  $U_{a'c} = U_{ac} + \Delta U$ .

Если напряжения на шинах соседних ТП, питающих МПЗ, существенно различаются по величине при незначительном фазовом сдвиге относительно друг друга, то первичная обмотка (ПО) ВДТ – ВН 27,5 кВ – должна быть подключена к «своей»

отстающей фазе ТТ (точки «а» и «с» на рис. 1а). В этом случае напряжение вольтодобавки  $\Delta U = k \cdot U_{ac}$  приплюсовывается к базовому напряжению отстающей фазы без какого-либо фазового сдвига (рис. 1б).

### III.

Техническая эффективность ВДТ по повышению напряжения в тяговой сети без изменения фазового сдвига исследовалась методом математического моделирования.

В качестве расчётной использовалась схема двухстороннего питания двухпутного железнодорожного участка длиной 48 км. Исследовались два случая питания межподстанционной зоны: отстающей и опережающей фазами соседних подстанций и отстающими фазами соседних подстанций. Коэффициент передачи ВДТ  $k = 1 + kT = 1 +$  в расчётных схемах изменялся от 1,0 (ВДТ отсутствует) до 1,18, что соответствует величине ЭДС вольтодобавки 5,0 кВ на первичной обмотке трансформатора.

Таблица 2

**Предельные значения повышения напряжения в тяговой сети с помощью ВДТ типа ОРМЖ-10000/27.**

Удельная мощность тяговой нагрузки, кВт/км	$\Delta U_{т.с.}$ (кВ) при сопротивлениях подстанций (Ом):			
	5,0	7,5	10	15
250	<u>4,9</u>	<u>4,6</u>	<u>4,4</u>	<u>4,1</u>
	4,0	3,6	3,2	2,0
500	<u>4,7</u>	<u>4,1</u>	<u>3,7</u>	<u>2,7</u>
	2,1	2,0	1,8	1,55
1000	<u>3,6</u>	<u>2,5</u>	<u>1,4</u>	-
	1,9	1,5	1,1	

При этом компенсационная обмотка (КО) ВДТ – вторая секция обмотки НН – включалась последовательно с первой секцией обмотки НН (ВДО).

Расчёты выполнялись по эквивалентной синусоиде при удельной активности мощности тяговых нагрузок на рассматриваемой и смежных зонах 250, 500 и 1000 кВт/км. Коэффициент мощности электроваза 0,8. Напряжение холостого хода подстанций принимались равным 29,0 кВ. Контактная подвеска ПБСМ – 95 + МФ – 100, рельсы Р 65. Некоторые результаты расчётов представлены в таблице 2.

Цифры, приведённые в числителе, означают прирост напряжения по всей длине межподстанционной зоны при питании её с обеих сторон отстающими фазами подстанций с ВДТ. Знаменатели – пророст минимального напряжения на зоне, питаемой отстающей фазой одной подстанции с ВДТ и опережающей фазой другой подстанции (без ВДТ).

Следует отметить значительный прирост напряжения по всей длине межподстанционной зоны, питаемой с двух сторон отстающими фазами соседних подстанций, достигаемый с помощью ВДТ в отстающих фазах. Даже при весьма больших тяговых нагрузках 500 кВт/км прирост напряжения за счёт ВДТ составляет 3,0–4,5 кВ. Использование ВДТ в таких условиях позволяет снять ограничения по минимальному напряжению при пропуске пакетов тяжелых поездов. Создаются возможности

к повышению пропускной и провозной способности участков и целых железнодорожных направлений.

Естественно, что с помощью одного ВДТ на зонах, питаемых отстающей и опережающей фазами соседних подстанций, обеспечивается меньший прирост напряжения; но эти зоны и не требуют обычно такого значительного повышения напряжения, как зоны, питаемые с двух сторон отстающими фазами соседних подстанций.

Таким образом, при установке ВДТ в отстающую фазу каждой подстанции при относительно равномерной их нагрузке (например, на равнинном участке) создаётся своего рода «равнопрочная» система электроснабжения с примерно одинаковыми пропускными и провозными способностями всех межподстанционных зон.

Существенно при этом то, что приведённые в таблице данные подтверждены результатами опытной эксплуатации ВДТ на тяговой подстанции Тяжин Красноярской железной дороги [3].

#### IV.

ВДТ является в настоящее время единственным техническим средством, способным компенсировать фазовый сдвиг напряжений на шинах соседних ТП, питающих с двух сторон одну МПЗ. В нормальных режимах работы СТЭ при её питании от одной энергосистемы этот сдвиг обычно не превышает 3–4 эл. Градусов. При питании соседних ТП от разных энергосистем





фазовый сдвиг может быть значительно большим.

Для компенсации фазового сдвига напряжений на шинах соседних ТП, питающих одну МПЗ, нужно использовать другие способы подключения ПО ВДТ к ТТ.

Если ПО ВДТ подключить к опережающей фазе ТТ (к зажимам «с» и «в»), то напряжение  $\Delta U$  будет добавляться к базовому напряжению отстающей фазы под углом  $-60$  эл. Градусов. Если же ПО ВДТ подключить к свободной фазе ТТ (к зажимам «а» и «в»), то напряжение  $\Delta U$  будет добавляться к базовому напряжению отстающей фазы  $U_{ac}$  под углом  $+60$  эл. градусов (см. рис. 1б). При этом можно полагать, что 50% абсолютной величины напряжения вольтодобавки ( $\Delta U \cdot \cos 60^\circ = 0,5 \Delta U$ ), то есть до 2,5 кВ, реализуется для повышения модуля напряжения на отстающей фазе ТП, а 86,5% ( $\Delta U \cdot \sin 60^\circ = 0,865 \cdot \Delta U$ ), то есть до 4,3 кВ — для устранения поперечной составляющей разности напряжений на шинах соседних ТП, или фазового сдвига этих напряжений относительно друг друга.

Большой интерес представляет использование одной секции обмотки НН с напряжением 2,5 кВ в качестве компенсационной обмотки, к которой через реактор Р подключается батарея конденсаторов С (см. рис. 1а). В этом случае может быть получен эффект ёмкостной компенсации [6].

Наличие разности напряжений на шинах соседних ТП, питающих с двух сторон одну МПЗ, становится причиной протекания по тяговой сети так называемого уравнительного тока.

Протекание уравнительного тока приводит к увеличению потерь энергии в системе тягового электроснабжения, изменяет величину и фазу токов плеч питания тяговых подстанций, перераспределяет нагрузку между подстанциями, осложняет работу защит ТП и т. д. [1].

Кроме того, уравнительный ток вызывает дополнительный нагрев проводов контактной подвески и обмоток тяговых трансформаторов, снижает пропускную способность СТЭ по току, приводит к ускоренному старению и износу электрической изоляции обмоток ТТ и т. д..

Фактически тяговая сеть является до-

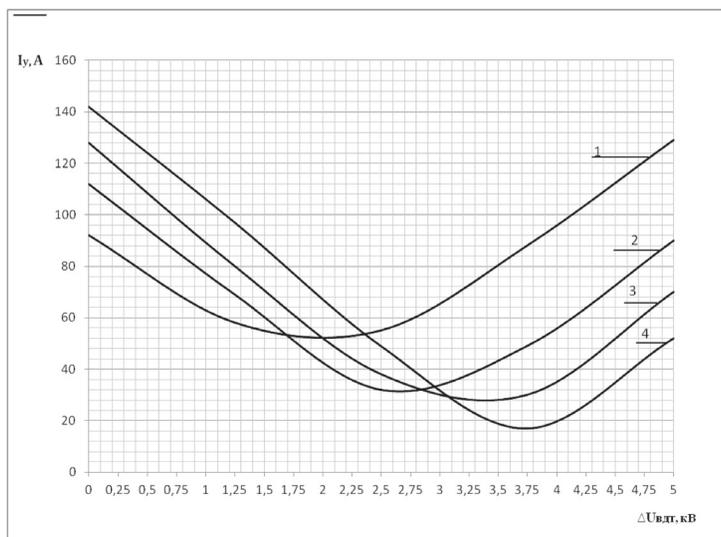
полнительной ветвью «включённой» параллельно одной из фаз линии продольного электроснабжения на участке между двумя соседними ТП. На следующем участке имеет место параллельное соединение тяговой сети с другой фазой линии продольного электроснабжения. Это соединение осуществляется посредством ТТ соседних ТП. По сути, тем самым тяговая сеть помогает ЛЭП в транзите энергии.

Для электрифицированных железных дорог такой транзит электроэнергии невыгоден. Ведь дорога вынуждена при этом оплачивать потери электроэнергии в СТЭ, обусловленные транзитом по ней «чужой» энергии.

Исследования, выполненные сотрудниками МИИТ на ряде участков Юго-Восточной, Горьковской, Северо-Кавказской и Красноярской железных дорог, выявили МПЗ с уравнительными токами 30–100 и даже 200–300 А, протекающими круглосуточно вне зависимости от изменения величин токов тяговых нагрузок. Из печатных научных источников известно, что на отдельных МПЗ величина потерь энергии от уравнительного тока достигает 3500 тыс. кВт·ч. в год. В среднем на каждой МПЗ, где имеется уравнительный ток, ежегодно теряется около 450 тыс. кВт·ч. электроэнергии [7].

Устранение главной причины протекания уравнительного тока, то есть разности модулей и фазового сдвига напряжений на шинах соседних ТП, питающих с двух сторон одну МПЗ, может быть достигнуто именно с помощью вольтодобавочного трансформатора типа ОРМЖ-10000/27.

Надо заметить, что определение величины уравнительного тока на действующих участках железных дорог в условиях эксплуатации представляет собой достаточно сложную техническую и организационную задачу. Наиболее просто уравнительный ток можно было бы определить в отсутствие тяговой нагрузки. Однако в ходе эксплуатации отключить на некоторое время все электровозы и остальной электроподвижной состав от тяговой сети нереально. В частности, отключение электровозов, ведущих поезда на подъём, может создать аварийную ситуацию. Изучить такие последствия дает, впрочем, компьютерное моделирование.



**Рис. 2.** Влияние вольтодобавки ВДТ  $\Delta U_{\text{ВДТ}} \cdot e^{-j60^\circ}$  на уравнильный ток при разных значениях  $\Delta \psi_{1-2}$ : 1-0°, 2-2°; 3-3°, 4-4°.

## V.

При создании компьютерной модели СТЭ МПЗ применялась методика, разработанная ранее на кафедре МИИТ [8].

Моделировалась работа СТЭ МПЗ применительно к двухпутному участку длиной 48 км при сопротивлении тяговой сети  $0,125+j0,3$  Ом/км. Зона получает питание слева от отстающей фазы ТП № 1 при  $\dot{E}_1 = 29e^{j\psi_1}$  кВ, справа – от опережающей фазы ТП № 2 при  $\dot{E}_2 = 29$  кВ, при этом фаза  $\psi_1$  изменялась от  $0^\circ$  до  $4^\circ$ . Входные сопротивления ТП со стороны шин 27,5 кВ были равны  $1+j5$  Ом. Токи источников, учитывающие токи смежных плеч питания ТП:  $J_1 = 375e^{-j97}$  А,  $J_2 = 375e^{j23}$  А. На зоне находились шесть поездов. Токи электровозов соответствовали 250 А при коэффициенте мощности 0,8.

В расчетной схеме предусматривалось включение УПРК в отстающую фазу ТП № 1, а для ограничения уравнильного тока в рассечку фидера отстающей фазы – вольтодобавочной обмотки трансформатора. Первичная обмотка ВДТ могла подключаться как к «своей» – отстающей фазе ТТ, так и к другим фазам – опережающей или свободной.

Определение величины уравнильного тока выполнялось двумя способами. Во-первых, он может фигурировать как ток в тяговой сети в отсутствие электровозов. Расчетная схема имела в виду размыкание ветвей, имитирующих электровозы. В этом случае токи плеч питания ТП № 1 и ТП № 2 являлись уравнильными  $I_1 = I_2 = I_y$ .

Во-вторых, при наличии на МПЗ электровозов уравнильный ток определялся по известному выражению  $I_y = 0,5 \cdot |I_1 - I_2|$ .

Сопоставление результатов оценки уравнильного тока этими двумя методами указывает на их вполне удовлетворительное совпадение. Расхождения в большинстве опытов не превышали 5–10 А.

В процессе компьютерного моделирования работы СТЭ МПЗ был получен большой объем данных. Некоторые из них, касающиеся опытов по ограничению уравнильного тока с помощью ВДТ, приведены на рис. 2 в виде кривых.

Анализ полученных результатов показывает, что с помощью ВДТ можно заметно уменьшить уравнильный ток, протекание которого обусловлено наличием поперечной составляющей разности напряжений на шинах соседних ТП, питающих с двух сторон одну МПЗ.

В рассматриваемом примере расчета «добавка» напряжения в тяговую сеть  $\Delta U = 3,75 \cdot e^{-j60^\circ}$  к базовому напряжению отстающей фазы способствует уменьшению уравнильного тока с 143 до 14 А, то есть примерно в 10 раз. При этом потери энергии в тяговой сети МПЗ от уравнильного тока уменьшаются с 1 млн кВт·час в год до 10 тыс. кВт·час или примерно в 100 раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью вольтодобавочного трансформатора дается возможность ском-





пенсировать (нейтрализовать) специфические недостатки существующей системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ (отрицательный эффект отстающей фазы) и предрасположенность этой системы к протеканию уравнительного тока, особенно при наличии установок продольной емкостной компенсации в отстающей фазе тяговой подстанции.

Вольтодобавочный трансформатор остается сегодня единственным техническим средством, способным компенсировать поперечную составляющую разности напряжений на шинах соседних тяговых подстанций, питающих с двух сторон одну межподстанционную зону.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1982. — 528 с.

2. Караев Р. И., Власов С. П., Заволока О. Г., Фролов А. В., Болдырев В. И., Цыбанков В. А., Волчков В. А., Мамсуров В. А. Авторское свидетельство № 1299852 СССР, МКН в 60 м 3/02. Устройство для электроснабжения тяговых сетей переменного тока. Заявлено 30.10.1985, опубликовано 30.03.1987. Бюллетень № 12.

3. Власов С. П., Фролов А. В., Асанов Т. К. Эксплуатационные испытания вольтодобавочного трансформатора типа ОРМЖ-10000/27 // Транспорт: наука, техника, управление. — 1994. — № 5. — С. 25–27.

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

5. Власов С. П. Риски компенсирует система тягового электроснабжения // Мир транспорта. — 2012. — № 3. — С. 60–65.

6. Силкин В. Н. Совершенствование системы тягового электроснабжения путем использования многоцелевых вольтодобавочных трансформаторов. Автореф. дис... канд. техн. наук. — М., — 1990. — 24 с.

7. Бочев А. С., Осипов В. А. Снижение потерь от уравнительных токов // Тезисы докладов на международном симпозиуме Eltrans 2001. — СПб.: ПГУПС, 2001. — С. 80–81.

8. Караев Р. И., Власов С. П., Фролов А. В. Расчетные схемы тяговых сетей переменного тока 25 кВ // Электричество. — 1985. — № 9. — С. 60–62. ●

## BOOSTER TRANSFORMER: COMPENSATION OF LOSSES IN TRACTION POWER NETWORK

**Vlasov, Stanislav P.** — D. Sc. (Tech), professor at the department of theoretical basics of electrical engineering of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

*The article shows and substantiates with the help of computations and testing data the capacity of booster transformer to overcome the specific shortcoming effects of alternating current 25 kV traction power system widely used in Russia.*

*Particularly the booster transformer is capable to compensate (neutralize) negative effects caused by lagging phase, especially if there are units of capacitive longitudinal compensation in lagging phase of traction substation.*

**Key words:** railway, traction power system, electric locomotive, traction substation, booster transformer, voltage in traction network, booster winding, primary feeding winding, compensating current and its restriction.

## REFERENCES

1. Markvardt K.G. Electric power supply of electrified railways [*Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog*]. Moscow, Transport publ., 1982, 528 p.

2. Karaev R.I., Vlasov S.P., Zavoloka O.G., Frolov A.V., Boldyrev V.I., Tsybankov V.A., Volchkov V.A., Mamsurov V.A. Author's certificate № 1299852 SSSR, MKN v 60 m 3/02. Unit for electric power supply of traction AC networks [*Ustroystvo dlya elektrosnabzheniya tyagovykh setey peremennogo toka*]. Application deposited 30.10.1985, published 30.03.1987. Bulletin № 12.

3. Vlasov S.P., Frolov A.V., Asanov T.K. Operation testing of booster transformer ORMZh-10000/27 [*Ekspluatatsionnye ispytaniya vol'todobavochnogo transformatora tipa ORMZh-10000/27*]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*, 1994, № 5, pp.25–27.

4. Vlasov S.P. Multifunction booster transformer [*Mnogofunktsional'nyj vol'todobavochnyj transformator*]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*, 1994, № 5, pp.23–25.

5. Vlasov S.P. The System of Traction Power Supply Neutralizes the Risks [Riski kompensiruet sistema tyagovogo elektrosnabzheniya]. *Mir transporta* [World of transport and Transportation] *Journal*. 2012, Vol. 41, Iss.3, pp. 60–65.

6. Silkin V.N. Enhancement of traction power supply system by using multipurpose booster transformers [*Sovershenstvovanie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya putem ispol'zovaniya mnogotsel'nykh vol'todobavochnykh transformatorov*]. Abstracts of Ph.D. (Tech) thesis, Moscow, 1990, 24 p.

7. Bochev A.S., Osipov V.A. Reduction of losses caused by compensating current [*Snizhenie poter' ot uravnitel'nykh tokov*]. In: Theses of reports at international symposium Eltrans 2001 [*Tezisy dokladov na mezhdunarodnom simpoziume Eltrans 2001*]. St. Petersburg, PGUPS, 2001, pp. 80–81.

8. Karaev R.I., Vlasov S.P., Frolov A.V. Design diagram of traction AC 25 kV power networks [*Raschetnye shemy tyagovykh setey peremennogo toka 25 kV*]. *Elektrichestvo*, 1985, № 9, pp. 60–62.

Координаты автора (contact information): Власов С.П. (Vlasov S.P.) – (495) 684–2462.

Статья поступила в редакцию / article received 07.07.2013  
Принята к публикации / article accepted 19.07.2013