

УДК 621.311:621.331

В. П. ЗАКАРЮКИН, А. В. КРЮКОВ, Е. С. ИВАНОВА (ИРГУПС)

Иркутский государственный университет путей сообщения, Кафедра электроснабжения железнодорожного транспорта, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия, 664074, тел./факс: (3952) 638345, эл. почта: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## АНАЛИЗ СХЕМ СИММЕТРИРОВАНИЯ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Введение

Однофазные тяговые нагрузки электрифицированной железной дороги переменного тока создают существенную несимметрию в питающей трехфазной сети. Для снижения несимметрии традиционно применяется три типа тяговых подстанций (ТП) по фазировке подключения трансформаторов [1]. Такое присоединение ТП дает недостаточный эффект симметрирования, особенно для питающих электроэнергетических систем (ЭЭС) с мощностями коротких замыканий (КЗ) менее 1000 МВ·А. Одна из причин малой эффективности традиционного способа симметрирования состоит в наличии отдельных межподстанционных зон, расположенных на перевальных участках с резко выделяющимся энергопотреблением. Другая причина связана с неравномерностью движения поездов повышенной массы, вследствие чего нагрузки шести тяговых подстанций, образующих «винт», редко бывают сравнимыми по величине. Кроме того, точками присоединения тяговых подстанций к сетям 110-220 кВ являются вводы питающих ЛЭП 110-220 кВ, а не границы сетевого района, питающего группу тяговых подстанций. Эти обстоятельства приводят к росту одного из важнейших показателей качества электроэнергии – несимметрии напряжений питающей ЭЭС по обратной последовательности. Поэтому требуется разработка более эффективных технических решений по симметрированию тяговой нагрузки. Проблема несимметрии особенно серьезна для тяговых подстанций, питающихся от ЭЭС с малой мощностью КЗ.

### Схемы симметрирования

Из известных схемных решений по снижению несимметрии, создаваемой тяговыми нагрузками, можно выделить следующие.

*Схемы симметрирования двухфазной нагрузки путем формирования напряжений, отличающихся по фазе на 90°.* Сюда относится схема Скотта с двумя однофазными трансформаторами (рис. 1), трехфазные трансформаторы Мамо-

шина, Леблана, Кюбнера [2, 3], реализующие тот же эффект одним трехфазным трансформатором, двухфазные симметрирующие трансформаторы (ДСТ) Б. М. Бородулина (рис. 2) [4].

Применение схемы Скотта или трехфазных симметрирующих трансформаторов при модернизации требует замены существующего оборудования, что далеко не всегда приемлемо. Кроме того, трехфазные трансформаторы с большим количеством обмоток отличаются значительными напряжениями КЗ, что неблагоприятно сказывается на симметрирующем эффекте. В этом плане выгодно отличаются ДСТ, но их применение требует значительного увеличения трансформаторной мощности ТП. Достоинством ДСТ является возможность модернизации существующих ТП без смены силовых трансформаторов.

В целом же группа методов симметрирования с питанием плеч подстанций напряжениями, отличающихся по фазе на 90°, обладает существенным недостатком симметрирования только двух равных нагрузок.

*Схемы симметрирования на базе индуктивных и емкостных элементов.* Схемы симметрирования этого типа предполагают включение регулируемых реакторов и конденсаторных батарей на двух или на трех фазах трехфазной системы [5]. Наибольшее распространение получила схема Штайнмеца (рис. 3), наиболее эффективная при чисто активной нагрузке. В случае однофазной нагрузки в свободные фазы включаются реактор и батарея конденсаторов, реактивные мощности которых в  $\sqrt{3}$  раз меньше мощности симметрируемой нагрузки. Существенным достоинством схемы Штайнмеца является равенство номинальной трехфазной мощности трансформатора активной мощности однофазной нагрузки. Использование такой схемы на ТП в системе 1×25 кВ приведет к полному использованию мощности трансформатора для питания тяговой нагрузки.

Схема Штайнмеца обеспечивает симметрирование и активно-индуктивной нагрузки, однако общий коэффициент мощности при этом

© Закарюкин В. П. и др., 2013

снижается. Кроме того, для эффективного применения схемы требуется использование регулируемых индуктивно-емкостных элементов с высоким быстродействием. Разработанные в последние годы регулируемые источники РМ снижают остроту последней проблемы, однако стоимость такого оборудования остается высокой. Для симметрирования двухфазной тяговой нагрузки потребуется установка индуктивно-емкостных элементов на три фазы с разработкой алгоритма управления ими с учетом необходимости компенсации реактивной мощности и симметрирования двух нагрузок.

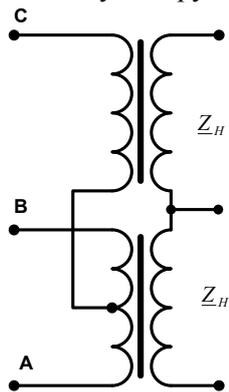


Рис. 1. Схема симметрирования Скотта

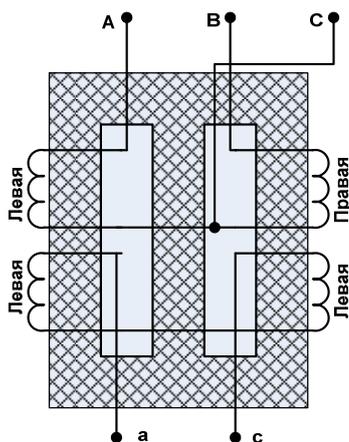


Рис. 2. Схема ДСТ Бородулина

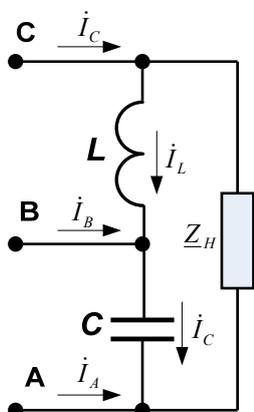


Рис. 3. Схема Штайнмеца для однофазной нагрузки

*Симметрирование компенсацией реактивной мощности.* Известным симметрирующим эффектом обладают установки поперечной компенсации, однако эффект этот обусловлен простым снижением потребляемого тягового тока при компенсации реактивной мощности, и, соответственно, применение компенсирующих установок не позволяет полностью устранить несимметрию, вызванную однофазными тяговыми нагрузками.

### Постановка задачи и методика моделирования

Отсутствие до последнего времени эффективных методов и инструментов для анализа симметрирующих свойств различных схем не позволяло провести сравнительные оценки их эффективности при взаимодействии с электрической системой и при учете реальных параметров элементов таких схем. Разработанные в ИРГУПСе методы и алгоритмы определения и анализа сложносимметричных режимов [6...17] и реализованный на их основе программный комплекс «Fazonord-Качество» позволяют проводить расчеты установившихся режимов ЭЭС с любыми видами трансформаторов и многопроводными системами различных схем и конструкций с корректным учетом параметров и схем соединения обмоток и проводов.

Для сопоставления разных схем симметрирования необходимо обеспечить сходные условия подключения схем и учет параметров элементов симметрирования. Сопоставительные расчеты были проведены для ситуации подключения трансформаторов к одноцепной линии электропередачи (ЛЭП) длиной 100 км, выполненной проводом АС-300 и питающейся от шин бесконечной мощности. Такая сеть обеспечивает сравнительно высокую мощность короткого замыкания на шинах подстанции величиной 1200 МВ·А. Для устранения дополнительных эффектов несимметрии, вносимых ЛЭП, в модели линии предполагалось наличие полного цикла транспозиции.

Для анализа были выбраны три схемы симметрирования: схема Скотта с двумя однофазными трансформаторами, схема с трехфазным тяговым трансформатором и ДСТ Бородулина, и схема Штайнмеца. Расчетные схемы, реализованные средствами комплекса «Fazonord-Качество» показаны на рис. 4. Схемы с ДСТ и Штайнмеца построены с использованием тяговых трансформаторов 40 МВ·А, 230/27.5 кВ.

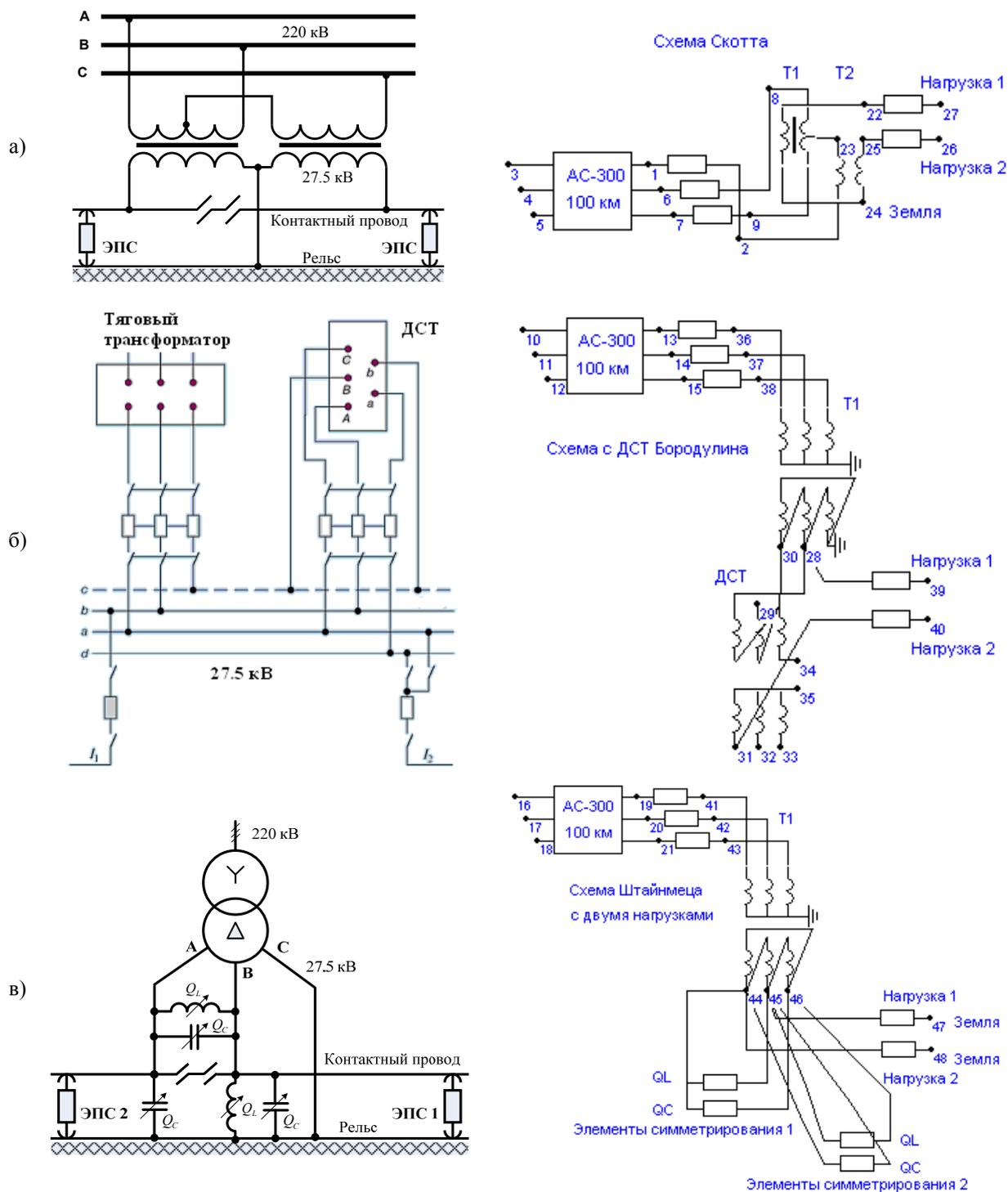


Рис. 4. Исходные и расчетные схемы: а) схема Скотта; б) ДСТ Б.М. Бородулина; в) схема Штайнмеца

Однофазный трансформатор Т1 схемы Скотта с напряжениями 110+110/27.5 кВ имеет параметры, соответствующие параметрам трансформатора ОРДТНЖ-25000/220, дополнительный трансформатор Т2 с номинальными напряжениями 191/27.5 кВ и мощностью 10 МВ·А имеет напряжение короткого замыкания 7 %.

Модель ДСТ Бородулина построена по параметрам, представленным в статье [4]: первичные напряжения 27.5 кВ, вторичные 15.9 кВ, номи-

нальная мощность 20 МВ·А, напряжение короткого замыкания 6.5 %.

### Результаты моделирования

Результаты представлены в табл. 1, 2 и 3 и на рис. 5...8.

Для определения показателей несимметрии проведены расчеты режимов при увеличении нагрузки 1 ( $P_1$ ) от 2 МВт до 20 МВт при нулевой нагрузке 2 ( $P_2$ ), и далее при увеличении последней до 20 МВт. Последние столбцы таб-

лиц 1, 2 представляют несимметрию при различных нагрузках плеч питания на 10 %, а последний столбец табл. 3 представляет несимметрию

при отклонении параметров симметрирующих элементов схемы Штайнмеца на 10 % от оптимального значения.

Таблица 1

**Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности первичных напряжений и токов трансформаторов схемы Скотта**

$P_1, \text{МВт}$	2	4	10	15	20	20	20	20	20
$P_2, \text{МВт}$	0	0	0	0	0	10	15	20	18
$k_{2U}, \%$	0,16	0,32	0,83	1,26	1,71	0,87	0,43	0,09	0,17
$k_{2I}, \%$	98,1	99,3	99,7	99,8	99,8	34,2	14,6	3,18	5,61

Таблица 2

**Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности первичных напряжений и токов трехфазного трансформатора схемы с ДСТ**

$P_1, \text{МВт}$	2	4	10	15	20	20	20	20	20
$P_2, \text{МВт}$	0	0	0	0	0	10	15	20	18
$k_{2U}, \%$	0,15	0,31	0,82	1,25	1,7	0,85	0,41	0,16	0,16
$k_{2I}, \%$	93,5	97,6	99,1	99,2	99,3	33,9	14,3	4,3	5,6

Таблица 3

**Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности первичных напряжений и токов трехфазного трансформатора схемы Штайнмеца**

$P_1, \text{МВт}$	2	4	10	15	20	20	20	20	20
$P_2, \text{МВт}$	0	0	0	0	0	10	15	20	20
$k_{2U}, \%$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,16
$k_{2I}, \%$	3,9	2,0	0,76	0,35	0,22	0,26	0,2	0,34	4,4

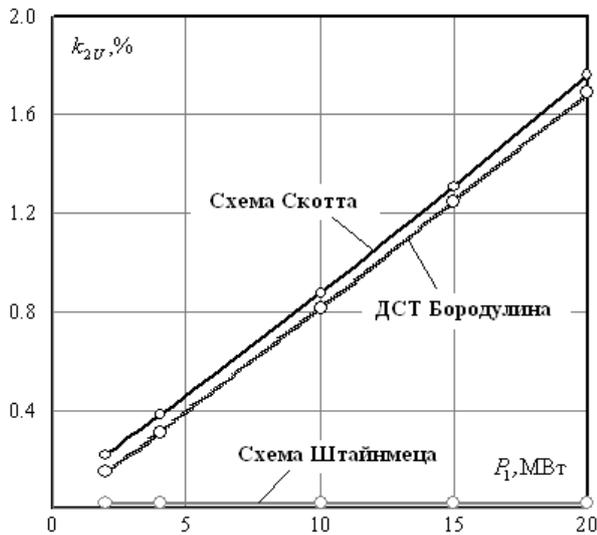


Рис. 5. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений от мощности нагрузки 1 при  $P_2=0$

Помимо представленных в таблицах результатов обнаружилось, что схема с ДСТ показывает наибольшее снижение напряжения на нагрузке. Схема Скотта характеризуется наименьшим снижением уровней напряжений 27,5 кВ в нагрузочных режимах. Небольшие значения несимметрии напряжений в расчетах обусловлены сравнительно мощной питающей ЭЭС. Схемы Скотта и ДСТ при чисто активных нагрузках

показали практически одинаковые результаты с коэффициентами несимметрии по обратной последовательности токов около 100 % для однофазной нагрузки, в то время как схема Штайнмеца демонстрирует значения несимметрии токов не более нескольких процентов. Расстройка режима от оптимального на 10 % увеличивает несимметрию незначительно, причем все три схемы в этом плане сопоставимы.

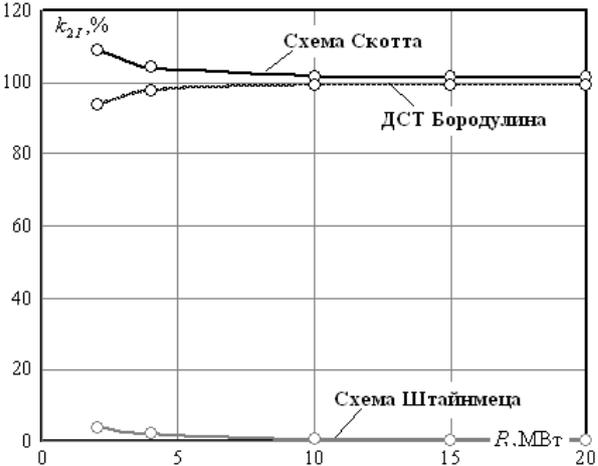


Рис. 6. Зависимость коэффициента несимметрии токов от мощности нагрузки 1 при  $P_2=0$

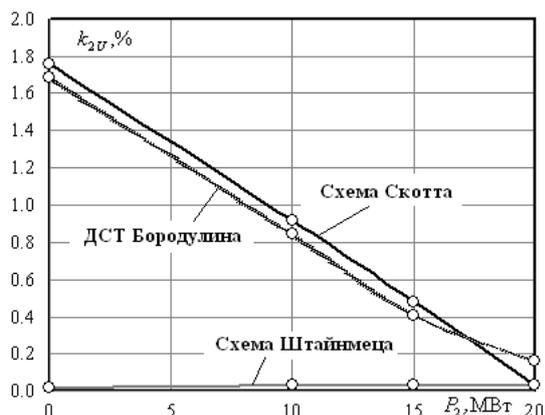


Рис. 7. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений от мощности нагрузки 2 при  $P_1=20$  МВт

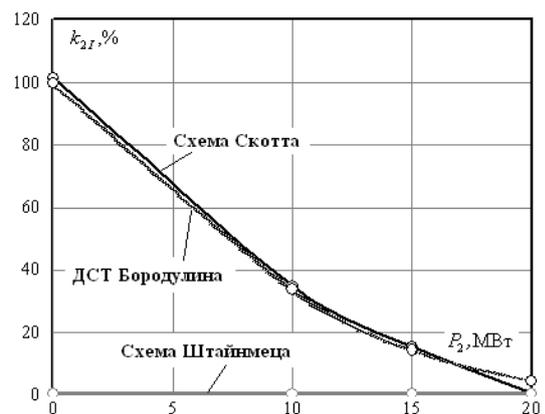


Рис. 8. Зависимость коэффициента несимметрии токов от мощности нагрузки 2 при  $P_1=20$  МВт

Отдельную проблему представляют собой высшие гармоники, генерируемые электроподвижным составом переменного тока. Гармоники, кратные трем, проникают в питающую сеть из-за наличия однофазной или двухфазной нелинейной нагрузки, а повышенный уровень гармонических искажений на стороне 27.5 кВ может представлять проблему для емкостных элементов схемы Штайнмеца.

Очевидно, что из трех рассмотренных выше технических решений по симметрированию схема Штайнмеца является наиболее предпочтительной, поскольку она не требует равенства мощностей плеч питания тяговой подстанции и обеспечивает одновременную компенсацию реактивной мощности.

Для этой схемы потребуются регулируемые элементы для трех фаз. Элемент фазы АВ, где по схеме рис. 4 присоединены элементы  $Q_L$  и  $Q_C$ , требует изменения реактивной мощности в пределах от генерации до потребления. Если ориентироваться на активную мощность плеча 20 МВт, то диапазон регулирования мощности фазы АВ составит от минус 12 Мвар до плюс 12 Мвар. Элемент  $Q_L$  фазы ВС для подстанции I типа по фазировке из-за необходимости ком-

пенсации реактивной мощности этой фазы работает в облегченном режиме. Однако ввиду необходимости компенсации нагрузки 1 при отсутствии нагрузки 2 он должен обеспечить также и реактивную генерацию, с ориентировочным изменением реактивной мощности для всех режимов в пределах  $\pm 12$  Мвар. Элемент  $Q_C$  фазы АС для подстанции I типа должен только генерировать реактивную мощность в соответствии с идеологией схемы рис. 3 и обеспечивать компенсацию тяговой нагрузки плеча. Таким образом, ориентировочные границы регулирования двух фаз должны быть в пределах  $\pm 12$  Мвар, а для третьей фазы потребуется генерация реактивной мощности в пределах от 0 до 24 Мвар.

Алгоритм регулирования схемы Штайнмеца требует измерения значений активной и реактивной мощностей нагрузок плеч питания подстанции на основной частоте и может включать следующие этапы.

1. По значению нагрузки плеча 1 вычисляется необходимая генерация реактивной мощности в этом плече для полной компенсации реактивной мощности.
2. То же делается и для плеча 2.
3. По величинам активного потребления плеч вычисляется необходимая генерация или потребление реактивной мощности в смежных фазах.
4. К требуемой генерации для условия симметрирования активной мощности добавляется реактивная мощность плеча питания, включенного параллельно рассматриваемой фазе (ВС и АС).
5. Из требуемой генерации плеча АВ вычитается индуктивная мощность, необходимая для симметрирования нагрузки 1.
6. По текущим значениям напряжений фаз определяются величины реактивных сопротивлений элементов, и производится соответствующее регулирование.

### Заключение

1. Из рассмотренных технических решений по симметрированию двухфазной тяговой нагрузки железной дороги переменного тока наиболее предпочтительной является схема Штайнмеца. Эта схема обладает следующими преимуществами:

- возможность симметрирования как двухфазной, так и однофазной нагрузки;
- одновременная компенсация реактивной мощности;
- полное использование номинальной мощности трехфазного трансформатора;
- невысокая чувствительность к погрешностям регулирования параметров схемы.

2. Для реализации симметрирующей схемы Штайнмеца требуется подключение к фазам 27.5 кВ тягового трансформатора мощностью 40 МВА двух регулируемых реактивных эле-

ментов с пределами регулирования в диапазоне от минус 12 Мвар до плюс 12 Мвар и одного с пределами реактивной генерации 0...24 Мвар.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

#### REFERENCES

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Мамошин Р. Р. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом / Р. Р. Мамошин, Б. М. Бородулин, А. Я. Зельвянский, А. Ф. Титов // Вестник ВНИИЖТ, 1989. – № 4. – С. 22-25.
3. Шалимов М. Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог / М. Г. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай. – Омск, 2002. – 49 с.
4. Бородулин Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока / Б. М. Бородулин // Вестник ВНИИЖТ, 2003. – № 2.
5. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 268 с.
6. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Иркут. ун-т, 2005. – 273 с.
7. Крюков А.В., Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Иркутск: ИрГУПС, 2011. – 170 с.
8. Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения железных дорог переменного тока / А.В. Крюков, В. П. Закарюкин, С. М. Асташин // Проблемы энергетики, 2008. – № 3-4. – С. 134-140.
9. Закарюкин В.П. Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2008. – № 3. – С. 93-99.
10. Крюков А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения в фазных координатах / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2009. – № 1. – С. 284-288.
11. Закарюкин В.П. Токораспределение в проводах линий электропередачи с расщепленными проводами / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Проблемы энергетики, 2010. – № 1-2. – С. 54-61.
12. Крюков А. В. Расчет электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями электрифицированных железных дорог / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, Н.В. Буякова // Вестник ИрГТУ, 2011. – №1 (48). – С.148-152.
13. Закарюкин В.П. Моделирование многообмоточных трансформаторов в фазных координатах / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Электротехника, 2008. – № 5. – С. 56-61.

1. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Electricity electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
2. Mamoshin R. R., Borodulin B. M., Zel'vianskiy A. Ya., Titov A. F. *Transformatory tyagovykh podstantsiy s povyshennym simmetriruyushchim efektom* [Transformers traction substations with increased effect of balancing]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT], 1989, no.4, pp.22-25.
3. Shalimov M. G., Maslov G. P., Magay G. S. *Sovremennoe sostoyanie i puti sovershenstvovaniya sistem elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog* [Current state and ways to improve power transmission electric railways]. Omsk, 2002. 49 p.
4. Borodulin B. M. *Simmetrirovaniye tokov i napryazheniy na deystvuyushchikh tyagovykh podstantsiyakh peremennogo toka* [Balancing currents and voltages at the existing traction substations AC]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT], 2003, no.2.
5. Shidlovskiy A. K., Kuznetsov V. G. *Povysheniye kachestva energii v elektricheskikh setyakh* [Improving the quality of energy in electric networks]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1985. 268 p.
6. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Slozhno-nesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [Difficult unbalance modes of electrical systems]. Irkutsk, Irkutsk University Publ., 2005. 273 p.
7. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Co-simulation methods and systems of external electric traction railways AC]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2011. 170 p.
8. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Astashin S. M. *Modelirovaniye sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Simulation of AC railway systems AC]. *Problemy energetiki* [Problems of Energy], 2008, no.3-4, pp.134-140.
9. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Modelirovaniye nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Simulation of non-sinusoidal regimes in power systems railways]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State University of Railways], 2008, no.3, pp.93-99.
10. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya v faznykh koordinatakh* [Modeling systems traction power in phase coordinates]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2009, no.1, pp.284-288.
11. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Tokoraspredele-niye v provodakh liniy elektropredachi s rasshcheplennymi provodami* [Current distribution in the wires of power lines with bundled conductors]. *Problemy energetiki* [Problems of Energy], 2010, no. 1-2, pp. 54-61.
12. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Buyakova N. V. *Raschet elektromagnitnykh poley, sozdavaemykh tyagovymi setyami elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Calculation of the electromagnetic fields generated by traction

14. Закарюкин В.П. Моделирование многоамперных шинопроводов / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, В. Ю. Соколов // Проблемы энергетики, 2009. – №3-4. – С. 65-73.

15. Крюков А.В. Управление системами тягового электроснабжения железных дорог / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, Н. А. Абрамов // Управление большими системами. Вып. 29. М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 201-213.

16. Крюков А. В. Определение наведенных напряжений с учетом несинусоидальности токов контактной сети железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, Д. С. Кобычев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2009. – №2. – С.315-319.

17. Закарюкин В. П. Параметрическая идентификация элементов системы электроснабжения железной дороги переменного тока / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, М. С. Шульгин // Вестник РГУПС, 2013. – № 2(50). – С. 37-47.

Поступила в печать 14.10.2013.

**Ключевые слова:** системы электроснабжения железных дорог, симметрирующие трансформаторы.

networks electrified railways]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of IrGTU], 2011, no.1(48), pp.148-152.

13. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Modelirovanie mnogoobmotchnykh transformatorov v faznykh koordinatakh* [Modeling multiwinding phase transformers coordinates]. *Elektrotehnika* [Electrical], 2008, no.5, pp.56-61.

14. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Sokolov V. Yu. *Modelirovanie mnogoampornykh shinoprovodov* [Modeling high current busbars]. *Problemy energetiki* [Problems of Energy], 2009, no.3-4, pp.65-73.

15. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Abramov N. A. *Upravlenie sistemami tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Traction power supply systems management of railways]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Managing large systems], 2010, no.29, pp.201-213.

16. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Kobychhev D. S. *Opredelenie navedennykh napryazheniy s uchetom nesinusoidal'nosti tokov kontaktnoy seti zheleznykh dorog peremennogo toka* [Determination induced voltages based on non-sinusoidal currents contact network of railways AC]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific transport problems of Siberia and the Far East], 2009, no.2, pp.315-319.

17. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Shul'gin M. S. *Parametricheskaya identifikatsiya elementov sistemy elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi peremennogo toka* [Parametric identification of elements of the system power supply railway AC]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of RGUPS], 2013, no.2 (50), pp.37-47.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

На основе компьютерного моделирования с помощью программного комплекса «Fazonord-Качество» проанализированы схемы симметрирования двухфазных тяговых нагрузок железных дорог переменного тока. Рассматривались схемы Скотта и Штайнмеца, а также двухфазные симметрирующие трансформаторы Б.М. Бородулина.

Показано, что наиболее предпочтительной является схема Штайнмеца, обладающая следующими преимуществами: возможностью симметрирования как двухфазной, так и однофазной нагрузки; снижением реактивного электропотребления; полным использованием номинальной мощности трехфазного трансформатора; невысокой чувствительностью к погрешностям регулирования параметров схемы. Выявлено, что для реализации схемы Штайнмеца требуется подключение к фазам 27.5 кВ тягового трансформатора трех регулируемых реактивных элементов.

Работа выполнена в рамках плана научных исследований по направлению "Интеллектуальные сети (Smart Grid) для эффективной энергетической системы будущего" (договор № 11.G34.31.0044 от 27.10.2011).

**УДК 621.311:621.331**

**В. П. ЗАКАРЮКИН, А. В. КРЮКОВ, К. С. ИВАНОВА (РГУПС)**

Иркутский державний університет шляхів сполучення, Кафедра електропостачання залізничного транспорту, вул. Чернишевського, 15, Иркутськ, Росія, 664074, тел./факс: (3952) 638345, ел. пошта: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## **АНАЛІЗ СХЕМ СИМЕТРУВАННЯ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ**

На основі комп'ютерного моделювання за допомогою програмного комплексу "Fazonord-Якість" проаналізовані схеми симетрування двофазних тягових навантажень залізниць змінного струму. Розглядалися схеми Скотта і Штайнмеца, а також двофазні симетруючі трансформатори Б. М. Бородуліна.

Показано, що найбільш прийнятною є схема Штайнмеца, оскільки має наступні переваги: можливість симетрування як двофазного, так і однофазного навантаження; зниженням реактивного електроспоживання; повне використання номінальної потужності трифазного трансформатора; невисока чутливість до похибок регулювання параметрів схеми. Виявлено, що для реалізації схеми Штайнмеца потрібно підключення до фаз 27.5 кВ тягового трансформатора трьох регульованих реактивних елементів.

Робота виконана у рамках плану наукових досліджень за напрямом "Інтеллектуальні мережі (Smart Grid) для ефективної енергетичної системи майбутнього" (Договір № 11.G34.31.0044 від 27.10.2011).

**Ключові слова:** системи електропостачання залізниць, симетруючі трансформатори.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саенко Ю. Л.*

© Закарюкин В. П. и др., 2013

UDC 621.311:621.331

V. P. ZAKARYUKIN, A. V. KRYUKOV, E. S. IVANOVA (IRSURT)

Irkutsk State Transport University, Department of railway transport power supply, 15 Chernyshevskaya Street, Irkutsk, Russia, 664074, phone/fax: (3952) 638345, e-mail: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## ANALYSIS OF BALANCING SCHEMES FOR RAILWAY AC TRACTION SUBSTATIONS

Two-phase traction loadings balancing schemes for alternating current railway were analyzed by means of the computer modeling with program «Fazonord-Kachestvo». Scott and Shtaynmets's schemes, and also two-phase symmetrizing transformers B. M. Borodulin were considered.

It is shown that the most preferable is Shtaynmets's scheme with the following advantages: possibility of balancing both two-phase and single-phase loading; decreasing of reactive power; full use of transformer rated power; low sensitivity to errors of parameters regulation. It is revealed that implementation of the Shtaynmets's scheme requires three adjustable reactive elements on 27.5 kV bases.

Work is performed within the plan of scientific researches "Intellectual Networks (Smart Grid) for an Effective Power System of the Future" (Contract No. 11.G34.31.0044 of 27.10.2011).

**Keywords:** systems of railroad power supply, symmetrizing transformers.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Saenko U. L.*

Шановні колеги!

Фахівцями кафедри “Електропостачання залізниць”  
Дніпропетровського національного університету залізничного  
транспорту ім. ак. В. Лазаряна підготовлена до друку монографія

### ПРОТИКОРОЗІЙНИЙ ЗАХИСТ СУМІЖНИХ ПРИСТРОЇВ У СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

СИЧЕНКО В.Г., ДЬЯКОВ В.О., КОЛЕСНИК Д.Р., ПОЛЯХ О.М.  
Монографія / За загальною редакцією д.т.н. Сиченка В. Г. – Дн-ськ:  
Вид-во Маковецький, 2013. – 402 с.

Монографія присвячена розгляду механізмів виникнення та розвитку корозійних процесів у пристроях інфраструктури тягового електропостачання та методів і засобів їх протикорозійного захисту. У монографії висвітлені результати багаторічних досліджень в області протикорозійного захисту суміжних пристроїв, виконаних на кафедрі Електропостачання залізниць ДНУЗТ ім. ак. Лазаряна та результати спільних робіт по захисту залізобетонних конструкцій, виконаних останнім часом спільно з фахівцями ДерждорНДІ та КНУБА.

Монографія призначена для працівників електрифікованих залізниць, може бути корисна проектувальникам, викладачам вищих навчальних закладів і технікумів, а також студентам, що навчаються за спеціальністю “Електрифікація залізниць”.

За довідками звертатись у редколегію.