

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311:621.331

Анализ схем симметрирования тяговых нагрузок железных дорог переменного тока*

В.П. Закарюкин^a, А.В. Крюков^b, Е.С. Иванова^c

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^azakar49@mail.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^civanova_es89@rambler.ru

Статья получена 2.09.2013, принята 19.11.2013

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.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, симметрирующие трансформаторы.

Analysis of draft loading balancing schemes for alternating current railroads

V.P. Zakaryukin^a, A.V. Kryukov^b, E.S. Ivanova^c

Irkutsk State University of Railway Engineering, 15 Chernyshevsky st., Irkutsk, Russia

^azakar49@mail.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^civanova_es89@rambler.ru

Received 2.09.2013, accepted 19.11.2013

The two-phase draft loading balancing schemes for alternating current railroads have been analyzed by means of computer modeling using the Fazonord-Kachestvo program. The Scott and Shtaynmets schemes as well as B. M Borodulin two-phase unbalanced-to-balanced transformers were considered. It has been shown that the most preferable is the Shtaynmets scheme demonstrating the following advantages: the possibility to balance both two-phase and single-phase loading; decrease in reactive electric power consumption; full utilization of a three-phase transformer rated power; low error sensitivity of the circuit parameters. It has been revealed that to implement the Shtaynmets scheme, it is necessary to connect three adjustable reactive elements to 27.5 kV phases.

The study has been performed within the framework of the scientific research "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 railroads power supply, unbalanced-to-balanced transformers.

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 эффек-

тивности 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 эф-

* 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.

фективных 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 Мамошина, 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. Дополнительным достоинством ДСТ является возможность модернизации существующих ТП без смены силовых трансформаторов.

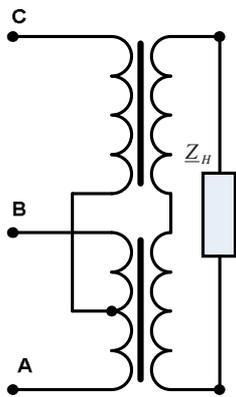


Рис. 1. Схемасимметрирования Скотта

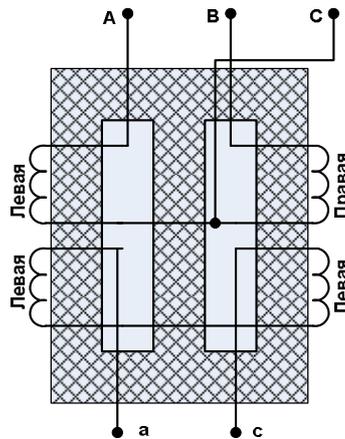


Рис. 2. Схема ДСТ Бородулина

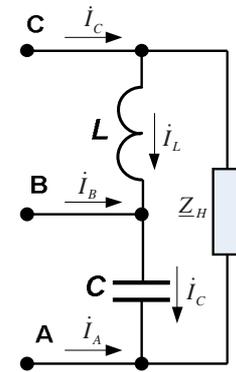


Рис. 3. Схема Штайнмеца для однофазной нагрузки

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

В целом же группа методов симметрирования с питанием плеч подстанций напряжениями, отличающихся по фазе на 90°, обладает двумя существенными недостатками:

- симметрируются только две равные нагрузки;
- при чисто активных нагрузках плеч имеет место потребление реактивной мощности (РМ) из питающей сети.

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.

Симметрирование компенсации 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 в 1200 МВ·А. Для устранения дополни-

тельных 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.

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 %.

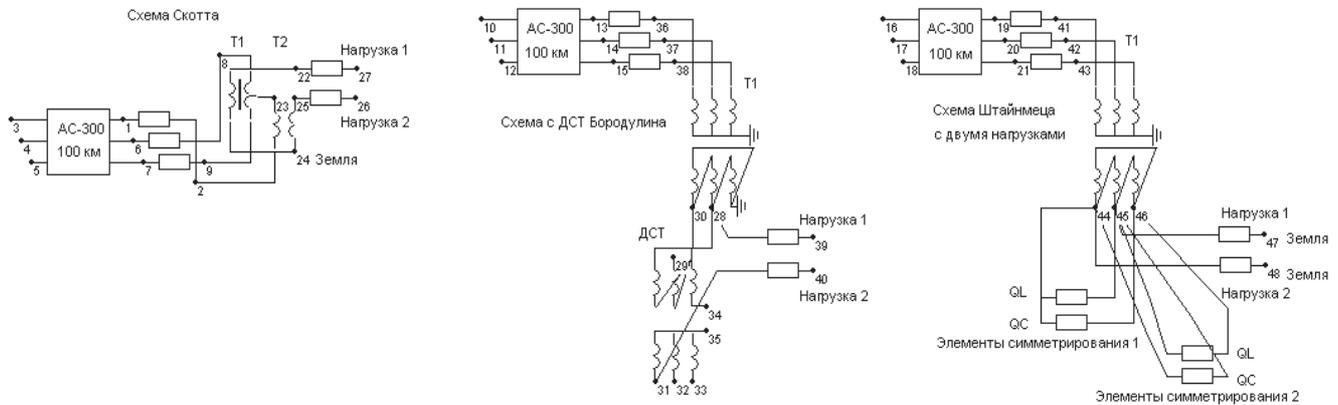


Рис. 4. Расчетная схема программного комплекса Fazonord

Модель ДСТ Бородулина построена по параметрам, представленным в статье [4]: первичные напряжения 27.5 кВ, вторичные 15.9 кВ, номинальная мощность 20

МВ·А, напряжение короткого замыкания 6.5 %.

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

Таблица 1

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

P_1 , МВт	2	4	10	15	20	20	20	20	20
P_2 , 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 , МВт	2	4	10	15	20	20	20	20	20
P_2 , 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

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

P_1 , МВт	2	4	10	15	20	20	20	20	20
P_2 , 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

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 табл. 1, 2 представляют несимметрию при различии нагрузок плеч питания на 10 %, а последний столбец табл. 3 представляет несимметрию при отклонении параметров симметрирующих элементов схемы Штайнмеца на 10 % от оптимального значения.

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 сопоставимы в этом плане.

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 QL и QC, 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 QL фазы ВС 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 ±12 Мвар.

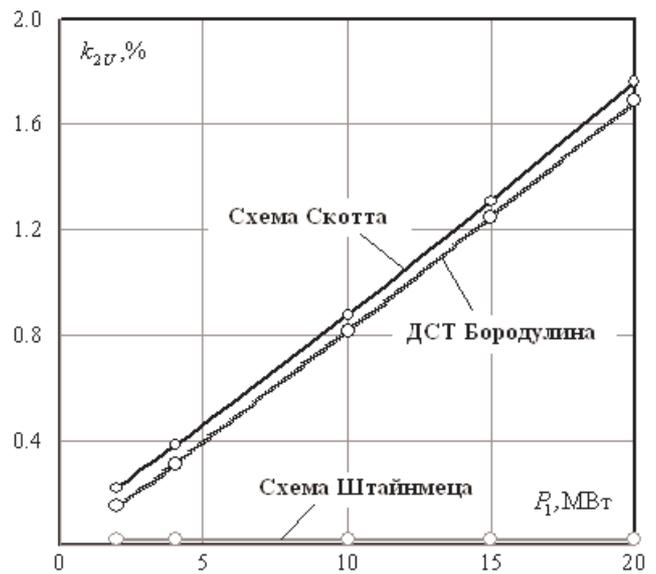


Рис. 5. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений от мощности нагрузки 1 при $P_2 = 0$

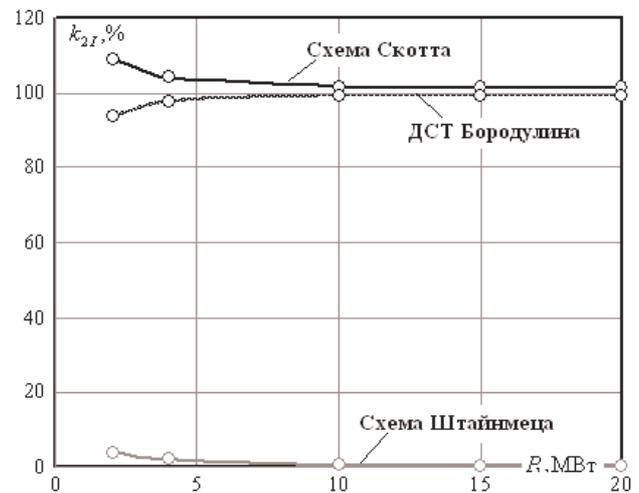


Рис. 6. Зависимость коэффициента несимметрии токов от мощности нагрузки 1 при $P_2 = 0$

То же касается и элемента QC фазы АС. Таким образом, ориентировочные границы регулирования всех

трех фаз должны быть в пределах ± 12 Мвар.

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

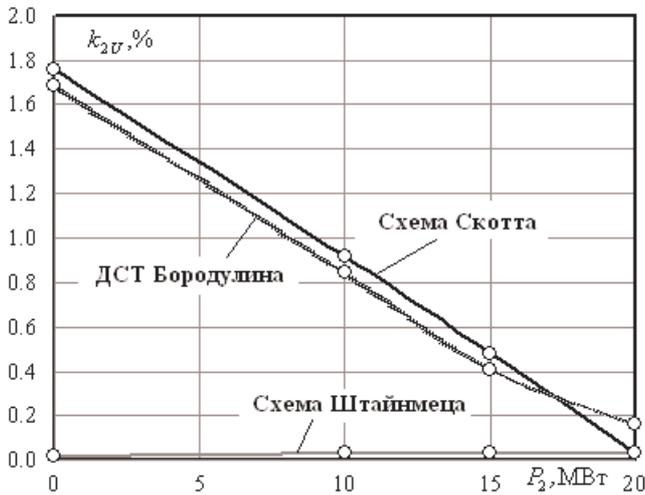


Рис. 7. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений от мощности нагрузки 2 при $P_1 = 20$ МВт

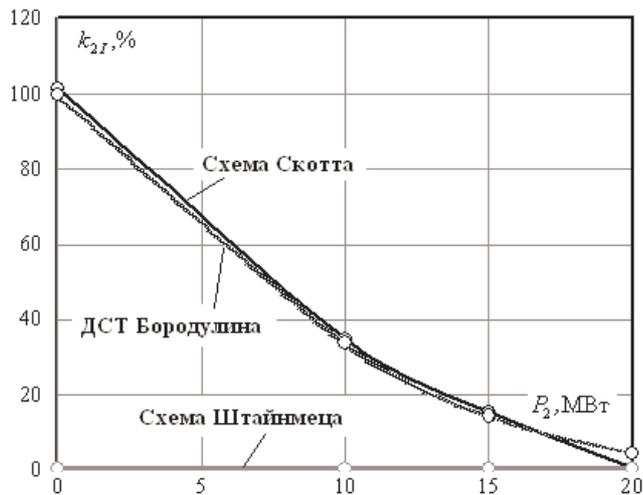


Рис. 8. Зависимость коэффициента несимметрии токов от мощности нагрузки 2 при $P_1 = 20$ МВт

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 вычисляются 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 (BC и AC).

5. Из требуемой генерации плеча АВ вычитается индуктивная мощность, необходимая для симметрирования нагрузки 1.

6. По текущим значениям напряжений фаз опреде-

ляются 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 трех регулируемых реактивных элементов с пределами регулирования в диапазоне от минус 12 Мвар до плюс 12 Мвар.

Литература

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
2. Мамошин Р.Р., Бородулин Б.М., Зельвянский А.Я., Титов А.Ф. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом // Вестн. ВНИИЖТ. 1989. № 4. С. 22-25.
3. Шалимов М.Г., Маслов Г.П., Магай Г.С. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог. Омск: 2002. 49 с.
4. Бородулин Б.М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока // Вестн. ВНИИЖТ. 2003. № 2.
5. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев: Наукова думка, 1985. 268 с.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.
7. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока: моногр. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 170 с.
8. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Асташин С.М. Моделирование систем электроснабжения железных дорог переменного тока // Проблемы энергетики. 2008. № 3-4. С. 134-140.
9. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог // Вестн. Рост. гос. ун-та путей сообщения. 2008. № 3. С. 93-99.
10. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения в фазных координатах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: сб. науч. ст. 2009. № 1. С. 284-288.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Токораспределение в проводах линий электропередачи с расщепленными проводами // Проблемы энергетики. 2010. № 1-2. С. 54-61.
12. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Расчет электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями электрифицированных железных дорог // Вестн. ИрГТУ. 2011. № 1 (48). С. 148-152.
13. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование многообмоточных трансформаторов в фазных координатах // Электротехника. 2008. № 5. С. 56-61.
14. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Моделирование многоамперных шинопроводов // Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 65-73.

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

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

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

References

1. Markvardt K.G. Energy supply for electrified railroads. М.: Transport, 1982. 528 s.

2. Mamoshin R.R., Borodulin B.M., Zel'vyansky A.Ya., Titov A.F. Transformers of rectifier substations with increased balancing effect // Vestnik VNIIZhT. 1989. № 4. S. 22-25.

3. Shalimov M.G., Maslov G.P., Magay G.S. The current state and ways to improve energy supply systems of electrified. Omsk, 2002. 49 s.

4. Borodulin B.M. Balancing adjustment of currents and voltages at the operating AC rectifier substations // Vestnik VNIIZhT. 2003. № 2.

5. Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G. Improvement of energy quality in electric power lines. Kiev: Naukova dumka, 1985. 268 s.

6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Unsymmetrically complex modes of electric systems. Irkutsk: Irkut. un-t. 2005. 273 s.

7. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Methods for concurrent simulation of traction and external power supply of AC railroads. Irkutsk: IrGUPS, 2011. 170 s.

8. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Astashin S.M. Modeling of power supply systems for AC railroads // Problemy energetiki. 2008. № 3-4. S. 134-140.

9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of nonsinusoidal modes in railroads power supply systems // Vestn. Rost. gos. un-ta putey soobshcheniya. 2008. № 3. S. 93-99.

10. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Modeling of traction power supply systems in phase coordinates // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2009. № 1. S. 284-288.

11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Current distribution in the wires of bundle wires power lines // Problemy energetiki. 2010. № 1-2. S. 54-61.

12. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. Calculation of electromagnetic fields generated by traction networks of electrified railroads // Vestnik IrGTU. 2011. № 1 (48). S.148-152.

13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of multi-winding transformers in phase coordinates // Elektrotehnika. 2008. № 5. S. 56-61.

14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. Modeling of heavy current power rails // Problemy energetiki. 2009. № 3-4. S. 65-73.

15. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Abramov N.A. Control of railways traction power supply systems // Upravlenie bol'shimi sistemami. Вып. 29. М.: IPU RAN, 2010. S. 201-213.

16. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Kobychev D.S. Determination of the induced voltage taking into account current unsinusoidality of the railroads overhead system // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2009. № 2. S. 315-319.

17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. Parametric identification of the AC railway power supply system // Vestnik RGUPS. 2013. № 2 (50). S. 37-47.

УДК 621.311

Интервальное моделирование аварийных режимов электроэнергетических систем

А.В. Крюков^а, А.И. Литвинцев^б

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^аand_kryukov@mail.ru, ^бalexanderlitvintsev@yahoo.com

Статья получена 2.08.2013, принята 19.11.2013

При моделировании нормальных и аварийных режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) параметры силовых элементов определяются по паспортным, проектным или справочным данным. При этом используется значительное число допущений, в частности, параметры считаются неизменными или слабо меняющимися во времени. В то же время известно, что указанные параметры зависят от многих факторов и могут претерпевать ощутимые изменения в процессе эксплуатации. Поэтому для корректного анализа ЭЭС требуются математические модели, учитывающие неопределенность исходных данных. Одним из эффективных средств учета неопределенности являются методы интервального анализа. В статье рассматриваются вопросы применения методов интервального анализа для расчетов аварийных режимов ЭЭС. В отличие от известных работ по интервальному анализу ЭЭС, в которых используется однолинейная постановка, предлагается более общий подход, основанный на использовании фазных координат и применимый для определения несимметричных установившихся режимов, а также задач расчета токов короткого замыкания (КЗ) при несимметричных повреждениях. Предлагается методика интервального определения токов короткого замыкания, основанная на использовании фазных координат и решетчатых схем замещения из RLC-элементов, соединенных по схемам полных графов. На основе компьютерного моделирования по разработанной экспериментальной программе Intcalc показано, что интервальный анализ является эффективным средством учета неопределенности исходных данных при расчете аварийных режимов ЭЭС. Эта задача приобретает особую актуальность на современном этапе развития электроэнергетики, характеризуемом масштабным внедрением микропроцессорных устройств релейной защиты и системной автоматики.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, аварийные режимы, интервальное моделирование.