

## ВЫБОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ОЭС СИБИРИ

В.В. ДИКОВИЧ\*, И.М. КАЦ\*\*, О.С. СТРЕМИЛОВА\*\*

\*Филиал АО «СО ЕЭС» Бурятское РДУ, Улан-Удэ

\*\*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск

*В статье проанализирована эффективность применения различных технических средств и организационных мероприятий для снижения несимметрии напряжения в восточной части ОЭС Сибири. При использовании технических средств проработаны алгоритмы управления ими. Проведенные исследования позволяют оптимальным образом выбрать технические средства и места их установки для снижения несимметрии напряжения, что позволяет повысить надежность работы потребителей и энергосистемы в целом.*

*Ключевые слова: несимметрия напряжений, FACTS, устройства компенсации реактивной мощности, тяговые потребители электроэнергии, система управления.*

### Введение

В настоящее время актуальной и нерешенной проблемой в районах с протяженными транзитными линиями, питающими тяговых потребителей электроэнергии, является значительная несимметрия токов и напряжений в сети. Большую долю нагрузки в восточной части ОЭС Сибири составляют тяговые подстанции, предназначенные для электроснабжения железнодорожного транспорта. Наличие несимметрии в питающей сети оказывает негативное влияние как на потребителей, так и на функционирование оборудования энергосистемы. К таким районам относится Восточная часть ОЭС Сибири, большую долю нагрузки которой составляют тяговые потребители электроэнергии. Одним из наиболее характерных участков здесь является западный район Байкало-Амурской магистрали (БАМ).

Целью работы является анализ электрических режимов работы Бурятской ЭЭС в районе БАМ с учетом тяговой нагрузки, а также исследование возможности симметрирования напряжения на данном участке, как на наиболее характерном.

Систему внешнего электроснабжения (СВЭ) западного участка Байкало-Амурской магистрали (рис. 1) образуют воздушные линии 220 кВ [1]. Для регулирования уровней напряжений на ряде подстанций установлены средства компенсации реактивной мощности, которые, в основном, являются нерегулируемыми или осуществляют регулирование сразу в трех фазах.

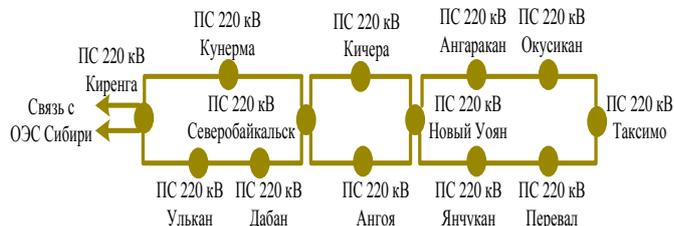


Рис. 1. Моделируемая схема системы внешнего электроснабжения Северобайкальского участка БАМ

Основными причинами высокого уровня несимметрии в проблемном энергорайоне являются следующие факторы:

- 1) большая доля тяговых потребителей;
- 2) отсутствие близких источников генерации;
- 3) недостаточный объем или отсутствие регулируемых однофазных устройств реактивной мощности.

Из-за разного потребления мощности по фазам наличие тяговой нагрузки приводит к появлению несимметрии напряжений и, как следствие, к появлению составляющих обратной последовательности. Степень данной несимметрии определяется суммарной мощностью, потребляемой железнодорожным транспортом, которая зависит от особенностей ландшафта, количества поездов и их массы на различных участках БАМ. Наихудшим, с точки зрения электрического режима, случаем является случай скопления большого количества поездов на одном перегоне между подстанциями или движение поездов по горным участкам БАМ. В этих случаях наблюдается значительное снижение напряжения как во всей сети, так и в отдельных фазах, к которым подключены тяговые подстанции. Это оказывает влияние на устойчивость работы как тяговой нагрузки, так и трехфазных потребителей. Также наличие несимметрии в питающей сети оказывает негативное влияние на функционирование оборудования энергосистемы. Как показал анализ коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, приведенный в работе [1], степень несимметрии на значительной части восточного участка БАМ превышает нормально допустимые значения.

Снижение несимметрии напряжений СВЭ БАМ можно достичь несколькими способами:

- 1) организацией графиков движения железнодорожного транспорта таким образом, чтобы выровнять загрузку по фазам на разных участках СВЭ;
- 2) применением схем симметрирования напряжения устройствами компенсации реактивной мощности, подключенными на стороне среднего (27,5 кВ) напряжения тяговых подстанций;
- 3) установкой пофазно-регулируемых источников реактивной мощности в СВЭ.

Для проведения исследований в программном комплексе *PSCAD* был смоделирован в трехфазном исполнении участок 220 кВ Северобайкальского транзита БАМ. Модель состоит из линий 220 кВ. За базовый режим принят режим зимнего максимума. В качестве источника бесконечной мощности принята ПС Киренга. Существующие подстанции тягового транзита учитывались в модели трансформаторами 220/27,5/10 кВ, на стороне 10 кВ которых подключена трехфазная симметричная нагрузка, а к стороне 27,5 кВ – тяговая нагрузка. В качестве единичной тяговой нагрузки была принята однофазная нагрузка мощностью 5 МВт, подключенная на переменное напряжение 1 кВ через понижающий трансформатор локомотива 27,5/1 кВ. Данная нагрузка соответствует нагрузке, создаваемой движением локомотива весом 3910 тонн [2]. Элементы контактной сети при моделировании нагрузки не учитывались.

#### **Оценка возможности снижения степени несимметрии за счет равномерного распределения тяговой нагрузки по фазам СВЭ**

На расчетной модели были проведены исследования зависимости степени несимметрии в СВЭ от распределения тяговых нагрузок на различных участках БАМ. На рис. 2 показаны результаты расчетов коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $k_{U2}$  при моделировании тяговых нагрузок на ПС Таксимо 5 МВт, на ПС Новый Уоян 10 МВт, на ПС Северобайкальск 15 МВт. Данная тяговая

нагрузка соответствует движению разного количества локомотивов по участкам БАМ, подключённым к разным фазам СВЭ.

В данном случае наблюдается значительное нарушение требований к величине  $k_{U2}$  (2% – нормально допустимое значение, 4% – предельно допустимое значение) начиная от ПС Кунерма в восточном направлении.

На рис. 3 показаны результаты моделирования тяговых нагрузок на ПС Таксимо 5 МВт, на ПС Новый Уоян 5 МВт, на ПС Северобайкальск 5 МВт, распределенных равномерно по фазам.

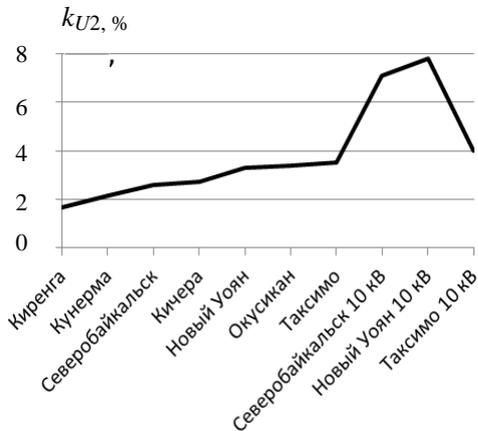


Рис. 2. Распределение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности при подключении тяговых нагрузок на разные фазы на ПС Таксимо ( $P_{AC}=5\text{МВт}$ ), на ПС Новый Уоян ( $P_{BC}=10\text{МВт}$ ), на ПС Северобайкальск ( $P_{AC}=15\text{МВт}$ )

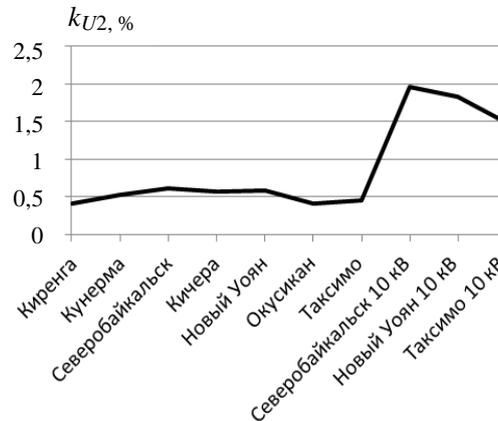


Рис. 3. Распределение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности при подключении тяговых нагрузок на разные фазы на ПС Таксимо ( $P_{AC}=5\text{МВт}$ ), на ПС Новый Уоян ( $P_{BC}=5\text{МВт}$ ), на ПС Северобайкальск ( $P_{AB}=5\text{МВт}$ )

Как видно из рис. 3, в данном случае не нарушаются требования (ГОСТ) [3] и несимметрия напряжений не превышает допустимые пределы.

#### Применение схемы симметрирования

В качестве схемы симметрирования нагрузки была выбрана схема Штейнмеца (рис. 4). Схема основана на включении в фазы конденсатора и катушки индуктивности по схеме треугольника [4].

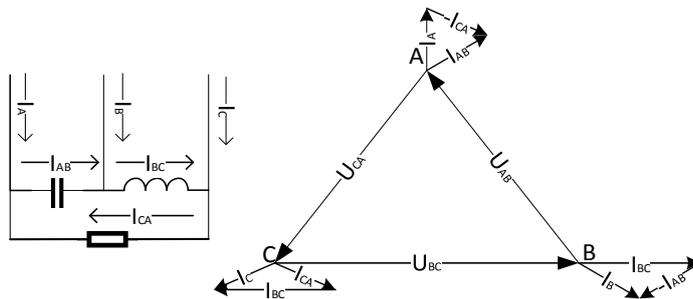


Рис. 4. Схема Штейнмеца, векторная диаграмма токов и напряжений

На рис. 5 показаны результаты моделирования использования схемы Штейнмеца. В данном опыте на ПС Таксимо была смоделирована тяговая нагрузка 5 МВт, параллельно которой по схеме Штейнмеца были подключены емкость и индуктивность. Из рис. 5 видно, что схема Штейнмеца позволяет снизить коэффициент несимметрии

напряжений по обратной последовательности в 2 раза. Это позволяет использовать данные устройства в качестве локальных устройств для снижения степени несимметрии тяговых нагрузок.

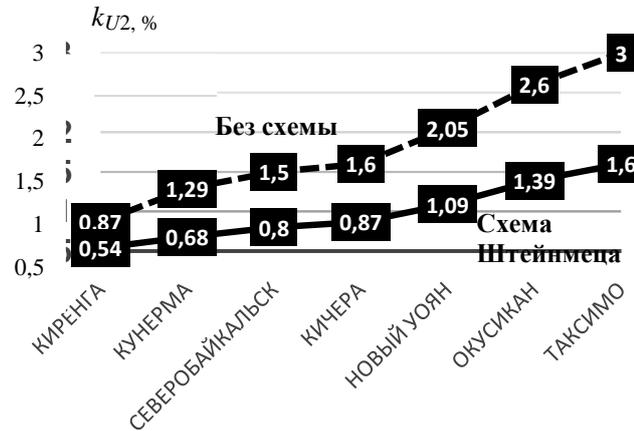


Рис. 5. Распределение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на стороне 220 кВ

### Применение статического компенсатора реактивной мощности

Для нормализации качества и симметрирования напряжения в данной работе проводилась оценка эффективности использования устройства СТАТКОМ с алгоритмом компенсации токов. Регулятор компенсации токов представлен на рис. 6 и состоит из двух контуров управления, по одному для прямой и обратной последовательностей [5].

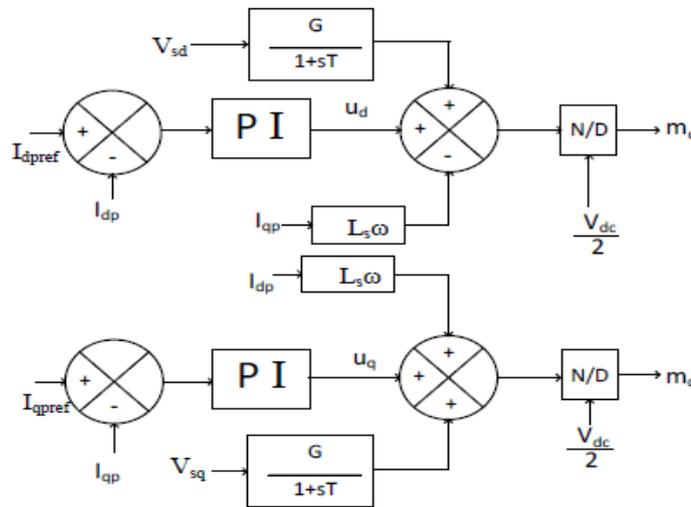
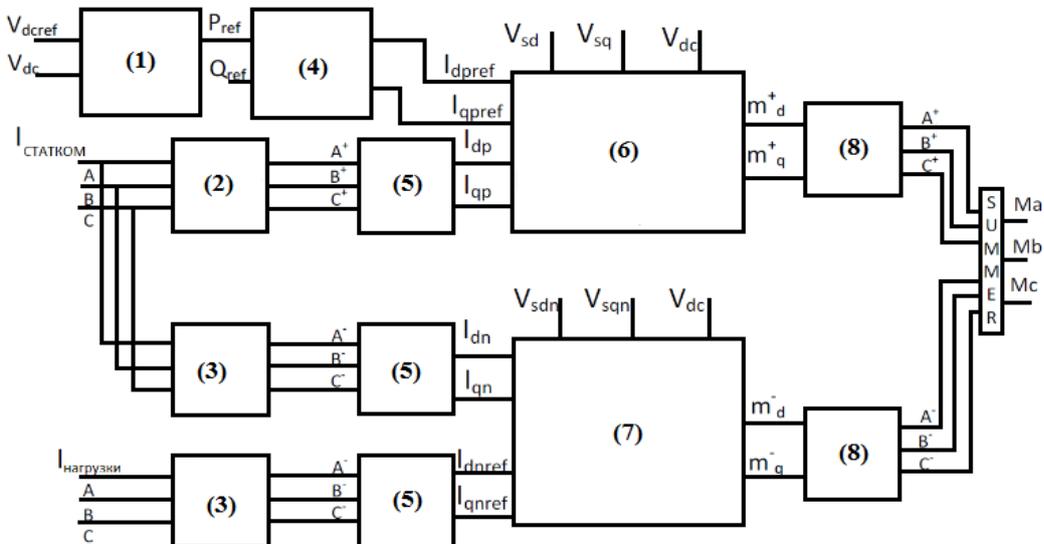


Рис. 6. Алгоритм компенсации токов

Структурная схема системы управления данным устройством показана на рис. 7. В качестве входных сигналов используются токи нагрузок ( $I$  нагрузки) и токи, вырабатываемые СТАТКОМом ( $I_{\text{СТАТКОМ}}$ ), а также напряжение на конденсаторе ( $V_{dc}$  и  $V_{dc\text{ref}}$ ). Из входных сигналов выделяются составляющие прямой и обратной последовательности. Затем сигналы раскладываются на  $dq$  составляющие и

сравниваются. Ошибка сравнения токов нагрузки и компенсатора подается на блок обратного преобразования и преобразуется в сигнал синусоидальной формы. После этого сигнал подается на блок широтно-импульсной модуляции, который вырабатывает сигналы управления ключами для формирования необходимого тока обратной последовательности, компенсирующего несимметрию в энергосистеме.



*Рис. 7. Блок-диаграмма алгоритма компенсации нагрузки: (1) – регулятор напряжения на конденсаторе; (2) – выделение прямой последовательности; (3) – выделение обратной последовательности; (4) – подсчет установок; (5) – преобразование из ABC в dq; (6) – компенсация токов прямой последовательности; (7) – компенсация токов обратной последовательности; (8) – преобразование из dq в ABC.  $I_{dpref}$  и  $I_{qpref}$  – заданные уставки токов dq-составляющих;  $I_{dp}$ ,  $I_{qp}$  – dq составляющие тока прямой последовательности СТАТКОМа;  $I_{dn}$ ,  $I_{qn}$  – dq составляющие тока обратной последовательности СТАТКОМа;  $I_{dnref}$ ,  $I_{qnref}$  – dq составляющие тока обратной последовательности нагрузки;  $V_{sdb}$ ,  $V_{sq}$  – dq составляющие напряжения прямой последовательности в точке подключения компенсатора к системе;  $V_{sdb}$ ,  $V_{sqn}$  – dq составляющие напряжения обратной последовательности в точке подключения компенсатора к системе;  $V_{dc}$  – напряжение на конденсаторе*

На рис. 8 показано изменение  $k_{U2}$  у потребителей на стороне 10 кВ при применении устройства СТАТКОМ на стороне 220 кВ и 27,5 кВ с тяговой нагрузкой в объеме 10 МВт на ПС Таксимо и 10 МВт на ПС Северобайкальск. Из рис. 8 видно, что СТАТКОМ обладает свойством симметрирования, этот эффект проявляется сильнее при установке устройства на стороне высшего напряжения.

### **Выводы**

В данной работе исследованы режимы работы тягового транзита западного участка БАМ при текущем уровне потребления электрической энергии железнодорожным транспортом.

На сегодняшний день тяговые потребители оказывают негативное влияние на показатели качества электрической энергии в этом районе. Также существует тенденция к увеличению грузоперевозок по БАМу в несколько раз к 2030 году [6], что приведет к значительному ухудшению текущей ситуации. Поэтому необходимо предусмотреть методы и средства, с помощью которых будет осуществляться возможность соблюдения требуемых показателей качества электрической энергии.

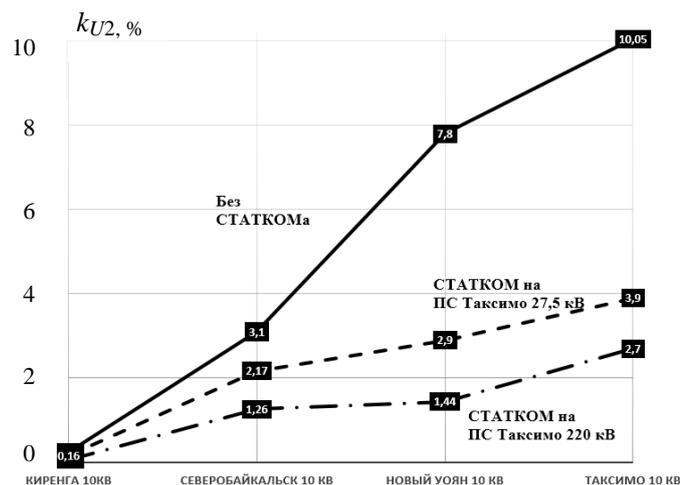


Рис. 8. Распределение  $k_{U2}$  на стороне 10 кВ при применении устройства СТАТКОМ на стороне 220 кВ и 27,5 кВ с тяговой нагрузкой на ПС Таксимо и на ПС Северобайкальск

Проведенные исследования показали следующее.

1. Благодаря равномерному распределению нагрузки по фазам можно удерживать показатели качества в допустимых пределах. Данный метод сложно осуществить, так как степень потребления мощности на различных участках БАМ определяется особенностями железнодорожных перевозок.

2. Применение схемы симметрирования гарантированно окажет соблюдение показателей качества электрической энергии. Также следует учесть, что тяговые нагрузки носят резко-переменный характер и для практического использования данного способа симметрирования необходимо предусмотреть тиристорные устройства регулирования величины вырабатываемой реактивной мощности емкостью и потребляемой реактивной мощности индуктивностью и систему управления ими.

3. Наиболее эффективным является вариант установки СТАТКОМ на ПС Таксимо на стороне 220 кВ. Работая по заданному алгоритму симметрирования устройство оказывает общесистемный эффект в широких пределах, однако данный вариант является наиболее дорогостоящим из рассмотренных выше. Поэтому вопрос выбора средств симметрирования сегодня заключается в сопоставлении стоимости устройств и эффективности методов.

### Summary

*The article includes the analysis of various technical tools for voltage unbalance reduction within the Eastern part of IPS of Siberia and describes control algorithms for them. It also analyzes the possibility of voltage unbalance reduction through administrative procedures. The conducted researches give an opportunity to choose technical tools and their installation sites to reduce voltage unbalance in the optimal way, that will help to increase operational reliability of consumers and the electric power system as a whole.*

**Keywords :** *voltage unbalance, FACTS, reactive-power compensation device, electrically propelled vehicles, management system.*

### Литература

1. Анохин Б.А., Красильникова Т.Г. Определение параметров симметрирующего устройства для устранения несимметрии напряжений в протяженной сети, питающей несимметричную нагрузку / Сборник научных трудов НГТУ. 2012. № 4(70). С. 145-32.

2. Буянова Д.В., Ворсина Н.С. Совершенствование управлением парком локомотивов восточного полигона / Сборник трудов Межвузовской итоговой конференции студентов. Иркутск: ИрГУПС, 2012. Часть 1. С. 42-46.

3. ГОСТ 32144 – 2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М., 2014. 20 с.

4. Савиных В.В. Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях до 1000 В на основе метода преобразования координат симметричных и ортогональных составляющих: автореф. дис...докт техн. наук. Южно-Российский гос. техн. ун-т, Новочеркасск, 2013. 42 с.

5. Gupta, Shubham, Comprehensive STATCOM control for distribution and transmission system applications. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2014.

6. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р.

*Поступила в редакцию*

*18 октября 2016 г.*

**Дикович Владимир Владимирович** – специалист 1 категории службы электрических режимов Филиала АО "СО ЕЭС" Бурятское РДУ, г. Улан-Удэ. E-mail: dicovvv@mail.ru.

**Кац Илья Маркович** – канд. техн. наук, доцент кафедры ЭЭС ЭНИН Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ), г. Томск. E-mail: katz@tpu.ru.

**Стремилева Ольга Сергеевна** – магистрант 2 года обучения ЭЭС ЭНИН Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ), г. Томск.