

УДК 621.333

Л.А. Герман ¹, К.С. Субханвердиев ², Н.Ю. Дмитриева ³

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА МЕЖПОДСТАНЦИОННОЙ ЗОНЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С УСТАНОВКАМИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

¹ Самарский государственный университет путей сообщения

² «Трансэлектропроект» филиала АО «Росжелдорпроект»

³ АО «Мосгипротранс»

Одним из подходов к повышению эффективности тяговой сети является применение фильтрокомпенсирующих установок (ФКУ). ФКУ, кроме повышения уровня напряжения, позволяют снизить уровень высших гармоник, источником которых является электроподвижной состав. Статья посвящена исследованию влияния ФКУ на распределение гармоник тока и напряжения. Рассмотрено два типа установок. Во-первых, ФКУ с реактором, обеспечивающим резонансную настройку на частоту 150 Гц. Во-вторых, ФКУ, представляющая собой статический генератор реактивной мощности (СГРМ). Выполнена оценка снижения несинусоидальности при включении ФКУ на посту секционирования на тяговой подстанции. Установлено, что включение ФКУ первого типа на пост секционирования позволяет снизить коэффициент гармонических составляющих напряжения примерно в 2 раза по сравнению с установкой на тяговой подстанции фильтров. Показано, что при включении СГРМ на посту секционирования по технико-экономическим причинам целесообразнее настраивать установку только на компенсацию реактивной мощности.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, несинусоидальность напряжения, статический генератор реактивной мощности, тяговая сеть, фильтрокомпенсирующая установка.

I. Введение

Установки поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока выполняются с функцией компенсации гармонических составляющих, которые генерирует электроподвижной состав, и поэтому они по существу являются фильтрокомпенсирующими установками (ФКУ). Одна из основных задач ФКУ – повышение уровня напряжения в тяговой сети при больших нагрузках и, тем самым, повышение пропускной способности тяговой сети систем 25 и 2х25 кВ. Этим подтверждается

высокая эффективность ФКУ, особенно если она регулируемая [1]. Однако ФКУ, компенсируя реактивную мощность, обладает еще дополнительными свойствами: снижает потери мощности, симметризирует нагрузки, уменьшает уровень высших гармоник.

В статье исследуется влияние ФКУ, устанавливаемых на постах секционирования (ПС), на распределение гармоник тока и напряжения на межподстанционной зоне и пути их снижения. Рассмотрены два типа ФКУ.

Первый тип представляет собой установку, в которую включают реактор, обеспечивающий резонансную настройку на частоту 150 Гц. Таким образом, установка является фильтром на 150 Гц, то есть демпфирует гармоники 150 Гц. Существуют аналогичные установки, состоящие из двух секций, где одна секция настроена на резонансную частоту в 150 Гц, а другая – на 250 Гц. Значит, такая ФКУ фильтрует гармоники частотой 150 и 250 Гц. Начиная с 1965 г., в России все ФКУ настроены на частоту 150 Гц, а некоторые на 150 и 250 Гц (в соответствии с [2] на 135-142 Гц и 240 Гц). ФКУ по разработкам ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (устройство компенсации реактивной мощности – УКРМ) работает в следующих вариантах: с резонансным фильтром на 150 Гц или с двумя резонансными фильтрами на 150 и 250 Гц. Регулируемая переключаемая установка также работает с резонансным фильтром на 150 Гц (особенности настройки фильтра указаны в [1]). Таким образом, в месте установки ФКУ благодаря настройке ее в резонанс напряжений с реактором, сопротивление и, как следствие, напряжение для n -ой гармоники равны нулю.

Вторым типом ФКУ, не так давно появившимся в тяговой сети переменного тока, является статический генератор реактивной мощности (СГРМ), по существу являющийся схемой статического компенсатора реактивной мощности (СТАТКОМ). Отличительная его особенность – отсутствие резонансной цепочки 150 Гц (а также 250 Гц). Тем не менее, генератор СГРМ может компенсировать гармоники любой частоты, для чего он дополнительно генерирует гармонические составляющие в противофазе к гармоникам электроподвижного состава (ЭПС). Поэтому его полная мощность складывается из мощности для компенсации реактивной мощности и мощности для компенсации гармонических составляющих. Отметим немаловажную особенность установки: по данным завода-изготовителя стоимость СГРМ мощностью 10 Мвар составляет более 100 млн руб.

Для СГРМ сопротивление n -ой гармонической у ПС в тяговой сети наибольшее, и поэтому напряжение этой гармоники у ПС будет также наибольшее.

В соответствии с ГОСТ [3] для тяговых подстанций на шинах 110 (220) кВ указаны нормы суммарного коэффициента гармонических со-

ставляющих напряжения, причем нормируются максимальные значения с вероятностью 0,95. Величина этого коэффициента в значительной степени зависит от входного сопротивления тяговых подстанций. Поэтому, прежде всего для «слабых» энергосистем, следует проверить значение суммарного коэффициента гармоник, и при необходимости выполнить соответствующие технические мероприятия по его снижению (в частности, рассмотреть применение различных типов установок компенсации).

II. Гармоники в тяговой сети

ЭПС в тяговой сети переменного тока систем 25 и 2х25 кВ является источником гармонических составляющих тока [4]. В технической литературе для гармоник порядка 3, 5 и 7, оказывающих наибольшее энергетическое влияние, приведены следующие данные по их содержанию (табл. 1).

Таблица 1.
Характеристика гармонических составляющих тока и напряжения на вводе тяговых подстанций

Источники	Величина напряжения гармоники, %		
	3	5	7
Бородулин Б.М. [2]	2-10	2-8	1-5
Мамошин Р.Р. [5]	3,5-12	5-11,5	3,5-7

В табл. 1 приведены обобщенные данные по гармоническим составляющим на вводе тяговых подстанций отечественных железных дорог. Разброс указанных напряжений в таблице объясняется различной мощностью энергосистем и различной удаленностью тяговых подстанций от источников питания, то есть входным сопротивлением тяговых подстанций. Для примера на рис. 1 представлены входные индуктивные сопротивления тяговых подстанций Горьковской и Восточно-Сибирской железных дорог [6].

Как видно, индуктивное сопротивление системы внешнего электропитания X_S , приведенное к напряжению 27,5 кВ тяговой сети, для большинства тяговых подстанций находится в пределах $0,2 \div 1,4$ Ом, на отдельных подстанциях X_S увеличивается до $2,0 \div 2,6$ Ом. В вынужденных режимах по данным энергосистем оно, как правило, увеличивается в 1,2-1,3 раза, хотя для отдельных подстанций может возрасти в 2 раза и более. В мощных энергосистемах при питании тяговых подстанций по линиям электропередачи небольшой протяженности, когда $X_S = 0,2 \div 0,8$ Ом, высшие гармонические составляющие напряжения существенно ниже и, как правило, не превышают требований по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения. Практические расчеты показывают, что примерно на 50 % тяговых подстанций при нормальном режиме

работы СТЭ значения гармонических составляющих напряжения на шинах 110 (220) кВ находятся в допустимых пределах, и поэтому в таком случае отсутствует необходимость применения технических средств для снижения гармонических составляющих.

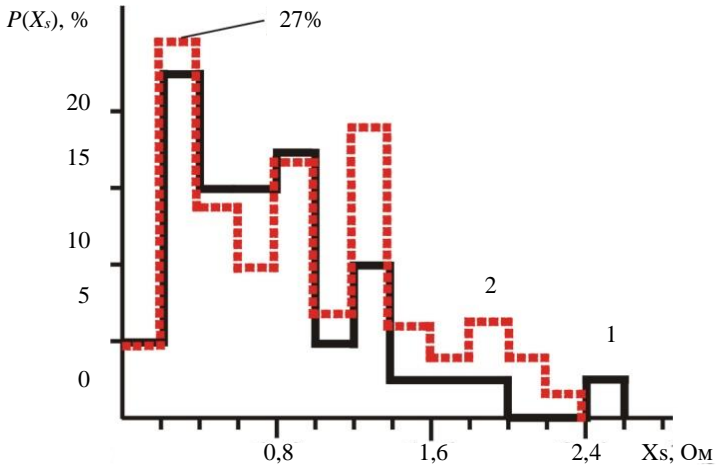


Рис. 1. Гистограммы распределения входного сопротивления тяговых подстанций (1 – для Горьковской и 2 – для Восточно-Сибирской железной дороги, $P(X_s)$ – вероятность распределения X_s)

Поскольку задача состоит в определении возможности ФКУ на ПС снижать уровень гармоник, определим токи гармоник межподстанционной зоны, приходящие на ПС. Другими словами, определим в мгновенной схеме межподстанционной зоны токи, отнесенные к ПС, путем разложения токов между тяговыми подстанциями и постом секционирования. Если в схеме замещения для расчета гармоник все источники токов ЭПС заменить источниками тока n -ой гармоники (рис. 2), то используя [7, 8], токи n -ой гармоники ПС равны:

$$I_{(n)ПС} = \sum_{i=1}^{m_c} I_{(n)i} \cdot \frac{l_i}{l_c} + \sum_{i=m_c+1}^m I_{(n)i} \cdot \frac{l-l_i}{l-l_c}, \quad (1)$$

где $I_{(n)i}$ – ток n -ой гармоники, l , l_c , l_i – расстояния между подстанциями, до ПС и до гармоники с номером i соответственно, m и m_c – число ЭПС на межподстанционной зоне и число ЭПС до ПС соответственно.

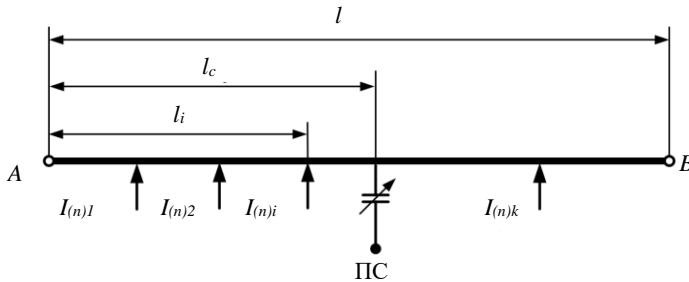


Рис. 2. К расчету токов высших гармонических составляющих при установке ФКУ на посту секционирования

Из [3] суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения равен:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{4,0} U_{(n)i}^2}{U_{(1)}^2}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $U_{(n)}$ – напряжение n -ой гармонической составляющей, $U_{(1)}$ – напряжение основной гармонической составляющей.

В соответствии с расчетами, наибольшие значения суммарного коэффициента гармоника напряжения без ФКУ отмечаются в середине межподстанционной зоны при двустороннем питании, то есть в районе ПС. Из рис. 3 [2] видно, что в общем случае гармоники тока в кривой тока ЭПС I увеличиваются при удалении от токоприемника к источнику питания, и наоборот, гармоники напряжения в кривой U при этом увеличиваются при удалении от источника к ПС.



Рис. 3. Ток I и напряжение U в различных точках системы электроснабжения: a – на электровозе; $б$ и $в$ – соответственно на тяговой подстанции и у источника питания

Если на ПС включена установка ФКУ с резонансными фильтрами на n -ую гармонику, то напряжение этой гармоники на ПС практически

равно нулю. В то же время, при отключении СГРМ на ПС будет наибольшее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих в тяговой сети.

III. Снижение суммарного коэффициента гармонических составляющих с помощью ФКУ

1. ФКУ на тяговых подстанциях

ФКУ поперечной емкостной компенсации [2] снижают уровень гармоник тока и напряжения на частоте настройки соответствующих фильтров ФКУ.

Проведем оценку степени снижения суммарного коэффициента несинусоидальности при включении на тяговой подстанции ФКУ с резонансными фильтрами. Пусть, в соответствии с [2], напряжения гармоник на шинах 27,5 кВ составляют: $U_3 = 2 \div 10 \%$, $U_5 = 2 \div 8 \%$ и $U_7 = 1 \div 5 \%$ (табл. 1). Если в ФКУ резонансный фильтр настроен на частоту третьей гармоники ($n = 3$), то суммарный коэффициент гармонических составляющих на шине ФКУ до и после включения фильтра равен: $3 \div 13,4$ и $2,2 \div 9,4$, то есть снижается примерно в 1,5 раза. Если же в ФКУ два резонансных контура на 150 и 250 Гц, коэффициент гармоник снижается до $1 \div 5 \%$, то есть снижается примерно в 3 раза. Как видно, при установке ФКУ с резонансными фильтрами на шинах тяговых подстанций 27,5 кВ возможно эффективное снижение суммарного коэффициента гармоник с целью реализации требований по нормативному документу [3].

2. ФКУ на посту секционирования и соблюдение нормативов по гармоникам на тяговых подстанциях

2.1. Нерегулируемая ФКУ

Как известно, в последние годы ФКУ устанавливают на постах секционирования для повышения пропускной способности участков железной дороги и снижения потерь мощности в тяговой сети. Рассмотрим степень снижения гармоник тока и напряжения при включении ФКУ на посту секционирования.

Для нерегулируемых ФКУ рассматриваются схемы ФКУ с резонансными фильтрами на 3-ю или на 3-ю и 5-ю гармоники. В этом варианте сопротивление ПС на 3-ю или на 3-ю и на 5-ю гармоники равно нулю (точнее, в соответствии с [2], равенство нулю на частотах 140 и 240 Гц).

Проведем оценку токов и напряжений гармоник у ПС. Для расчета принимаем входное сопротивление до ПС со стороны обеих подстанций одинаковым, а движение – равномерным. Тогда на основании (1) и рис. 2 сумма токов n -ой гармоники I_n межподстанционной зоны распределяется следующим образом: половина тока $I_n/2$ приходится на пост секционирования и $I_n/4$ – на каждую подстанцию.

Таким образом, если ФКУ установлена на ПС, то фильтруется половина суммы токов n -ой гармоники, в чем можно убедиться при контроле гармоники на тяговых подстанциях. Вышеуказанное распределение будет соблюдаться при любой тяговой нагрузке (и соответственно при любой величине n -ой гармоники). Аналогичное распределение гармоник в тяговой сети будет и при регулируемой переключаемой ФКУ с резонансным фильтром [1].

2.2. Регулируемая ФКУ

В качестве регулируемой ФКУ может использоваться статический генератор реактивной мощности (СГРМ). Он применяется в отечественных тяговых сетях [9]. СГРМ обладает способностью генерировать гармоники в противофазе гармоникам ЭПС, и, следовательно, их компенсировать. Как было указано, после разложения всех токов гармоник между подстанциями и постом секционирования к последнему примыкает практически половина всех гармоник. Генерируя на ПС гармонические составляющие в противофазе к гармоникам ЭПС, возможно решить две задачи: во-первых, снизить уровень гармоник в тяговой сети, следовательно, снизить потери мощности от гармонических составляющих и снизить электромагнитное влияние. Во-вторых, снизить уровень гармонических составляющих на шинах 110 (220) кВ тяговых подстанций, что требуется по нормативным документам.

Учитывая значительную стоимость СГРМ, следует на этапе проектирования рассмотреть альтернативный вариант: использование СГРМ на посту секционирования только для компенсации реактивной мощности (уменьшить общую мощность СГРМ). Для снижения суммарного коэффициента гармоник установить нерегулируемые фильтры (в общем случае, на 3-ю, 5-ю и 7-ю гармоники) на тяговых подстанциях. Например, при больших тяговых нагрузках возможен вариант включения СГРМ на посту секционирования и включения нерегулируемой установки ФКУ (например, УКРМ) с резонансными фильтрами на тяговой подстанции.

Следует отметить, что в компенсации гармоник тока и напряжения в тяговой сети регулируемая ФКУ поста секционирования недостаточно эффективна. Это же касается и компенсации реактивной мощности в тяговой сети. Причина заключается в постоянном смещении точки подключения ЭПС от ПС к подстанции и наоборот, а также в наличии только одной точки подключения источника реактивной мощности СГРМ у ПС.

В качестве примера разберем нагрузочную ситуацию. На левой половине тяговой сети (от подстанции до ПС) суммарный ток n -ой гармоники I_n , а на правой половине нет ЭПС. В этом случае на подстанции, питающей левую половину тяговой сети, снижение напряжения гармонических составляющих будет заметно, в то время как на противоположной под-

станции этого эффекта не наблюдается. Эффективность компенсации гармонических составляющих (так же, как и компенсация реактивной мощности) повышается при симметричном расположении нагрузок относительно поста секционирования.

IV. Результаты эксплуатации

Новые СГРМ включены на Западно-Сибирской, Северной и Горьковской (ГЖД) железных дорогах. Их основная цель – повышение пропускной способности участков железной дороги. Освоение этих установок осуществлялось Дорожными электротехническими лабораториями указанных дорог [10], которые определили пути их совершенствования и представили материалы, подтверждающие эффективность работы СГРМ. На основании результатов эксплуатации СГРМ можно сделать ряд важных заключений. В частности, на тяговой подстанции Марадьковский ГЖД при тяговой нагрузке ввода 27,5 кВ в 500 А суммарный коэффициент гармоник составил 7,3 % (при отключенном СГРМ) и 4,38 % (при включенном СГРМ). При включении СГРМ коэффициент гармоник снизился в 1,67 раз. Насколько полученный коэффициент соответствует нормативам, зависит от входного сопротивления подстанции. В частности, для рассматриваемой подстанции Марадьковский с шинами трансформаторной подстанции 220 кВ, коэффициент гармоник даже без СГРМ при больших нагрузках находится в пределах нормы.

Для большинства тяговых подстанций ГЖД, в связи со сравнительно мощными источниками питания энергосистем, сравнительно небольшими тяговыми нагрузками и равнинным профилем, как правило, коэффициент гармоник находится в пределах нормы. Поэтому при отсутствии специальных требований по снижению гармонических составляющих на рассматриваемой межподстаеционной зоне СГРМ следует настраивать только на компенсацию реактивной мощности.

По результатам работы [10] на шинах ПС среднее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения снизилось с 5,7 % до 2,1 %, а максимальное с 13,6 % до 8,6 %. Мощность СГРМ, задействованная на компенсацию реактивной мощности, при этом составляет 6,3 Мвар, а номинальная – 10 Мвар (то есть, на компенсацию средних значений суммарного коэффициента гармоник выделено 3,7 Мвар). Однако, в [10] отсутствуют сведения об изменении коэффициента гармоник на вводах смежных подстанций, который должен контролироваться по нормативным документам.

Если при включении нерегулируемых фильтров снижаются практически до нуля и средние, и максимальные значения коэффициента гармоник, то при включении СГРМ необходимо специально настраивать его на компенсацию соответствующих гармоник, что связано с необходимостью

формировать дополнительную мощность СГРМ. Например, производитель СГРМ для компенсации гармонических составляющих увеличивает мощность в $1,6 \div 2$ раза, причем снижение коэффициента гармоник в основном относится к средним значениям, максимальные значения снижаются в меньшей степени. Поэтому, во-первых, необходимость увеличивать мощность СГРМ для компенсации гармонических составляющих следует проверять на стадии проектирования. Во-вторых, в связи с немалой стоимостью СГРМ при необходимости снижать уровень гармонических составляющих следует рассмотреть альтернативный вариант и включать на шинах 27,5 кВ и 2х25 кВ тяговой подстанции нерегулируемые фильтры. Указанное также будет способствовать снижению несимметрии на тяговых подстанциях при включении установки в отстающую фазу.

V. Выводы

Включение ФКУ с резонансной настройкой на 150 Гц, а также на 150 и 250 Гц на тяговых подстанциях является эффективным способом снижения гармонических составляющих. При наличии резонансного фильтра на 150 Гц коэффициент гармонических составляющих напряжения снижается в 1,5 раза, а при наличии фильтров на 150 и 250 Гц – в 3 раза. Таким образом, в условиях эксплуатации практически всегда можно обеспечить соблюдение нормативных документов путем включения соответствующих фильтров.

При включении резонансных фильтров на посту секционирования коэффициент гармонических составляющих напряжения на тяговой подстанции снижается примерно в 2 раза по сравнению с вариантом, когда фильтры установлены на тяговой подстанции. СГРМ (без резонансных фильтров), включенный на посту секционирования, решает главную задачу: повышает пропускную способность межподстанционной зоны тяговой сети. Однако СГРМ обладает дополнительным свойством, он может компенсировать гармонические составляющие, генерируемые электроподвижным составом, для чего необходимо увеличивать мощность установки, ориентируясь на максимальные значения гармонических составляющих на шинах тяговых подстанций.

При включении СГРМ на посту секционирования целесообразно по технико-экономическим расчетам, учитывая его повышенную стоимость, настраивать СГРМ только на компенсацию реактивной мощности и повышение пропускной способности, а при необходимости снижать гармонические составляющие для соблюдения соответствующих требований нормативных документов – включать нерегулируемые фильтры на тяговых подстанциях.

© Герман Л.А., 2019

© Субханвердиев К.С., 2019

© Дмитриева Н.Ю., 2019

Библиографический список

- [1] Герман Л.А. Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2018. № 5. С. 288-294.
- [2] Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
- [3] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [4] Тамазов А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. М.: Транспорт, 1965. – 235 с.
- [5] Мамошин Б.М. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1973. – 224 с.
- [6] Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. 2013. № 2. С. 12-17.
- [7] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. Транспорт, 1982. – 528 с.
- [8] Герман Л.А. Способ регулирования мощности поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с выпрямительными установками, Пат. 628520 РФ, опубл. 13.04.77. – Бюл. № 38, 1978.
- [9] Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог. Книгинино: НГИЭУ, 2017. – 402 с.
- [10] Кващук В.А., Никонов А.В., Компенсация высших гармонических составляющих тягового тока статическим генератором реактивной мощности СТАТКОМ // Информационный листок Западно-Сибирской ЖД. 2018. С. 4.

L.A. German ¹, K.S. Subhanverdiev ², N.Yu. Dmitrieva ³

**CURRENT AND VOLTAGES HARMONIC
DISTRIBUTION ON AREA BETWEEN SUBSTATIONS
OF AC TRACTION NETWORK WITH SHUNT
COMPENSATIONS INSTALLATIONS**

¹ The Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod
Nizhniy Novgorod, Russia

² «Transelektroproject» the branch office of JSC Roszheldorproject
Moscow, Russia

³ JSC «Mosgirotrans»
Moscow, Russia

Abstract. One approach to improving the efficiency of the traction network is the use of filter – compensating installations (FCI). In addition to increasing the voltage level, FCI can reduce the level of higher harmonics, that are generated by electric rolling stock. The article is devoted to the study of the effect of FCI on the distribution of current and voltage harmonics. Two types of installations are considered – FCI with a reactor providing resonance tuning at a frequency of 150 Hz, and a static reactive power generator (SRPG). The estimation of the reduction of non-sinusoidality with the inclusion of FCI at the section post at the traction substation has been performed. It has been established that the inclusion of a FCI of the first type at the section post reduces the harmonic component of the voltage by about 2 times compared with the installation of filters at the traction substation. It is shown that SRPG installation at the section post is more expedient to adjust only to reactive power compensation for technical and economic reasons.

Keywords: filter-compensating installation, non-sinusoidal voltage, reactive power compensation, static reactive power generator, traction network.

References

- [1] L.A. German, «Efficiency of adjustable few – stage filter compensating installations in AC traction network», *Vestnik of the Railway Research Institute*, vol. 5, pp. 288-294, 2018.
- [2] B.M. Borodulin, L.A. German and G.A. Nikolaev, *Kondensatornyye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog*. Moscow: Transport, 1983, P. 183 (in Russian).
- [3] Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks, EN 50160-2010 ed 3.0, July 2010.
- [4] A.I. Tamazov, *Nesimmetriya tokov i napryazheniy, vyzyvayemaya odnofaznymi tyagovymi nagruzkami*. Moscow: Transport, 1965 (in Russian).
- [5] B.M. Mamoshin, *Povysheniye kachestva energii na tyagovykh podstantsiyakh dorog peremennogo toka*. Moscow: Transport, 1973 (in Russian).
- [6] L.A. German and V.P. Goncharenko, «Modern design of series capacitive compensation in the traction electrical supply system», *Vestnik of the Research Institute of Electric and Physical Apparatus*, vol. 2, pp. 12-17, 2013.
- [7] K.G. Marquardt, *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [8] L.A. German, «Sposob regulirovaniya moshchnosti poperechnoy yemkostnoy kompensatsii v tyagovoy seti s vypryamitel'nyimi ustanovkami», R.F. Patent 628520, April 13, 1977 (in Russian).
- [9] L.A. German, A.S. Serebryakov and D.E. Dulepov, *Fil'trokompensiruyushchiye ustanovki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog*. Knyaginino: NIEGU, 2017, P. 402 (in Russian).
- [10] V.A. Kvaschuk and A.V. Nikonov, «Kompensatsiya vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh tyagovogo toka staticheskim generatorom reaktivnoy moshchnosti STATKOM», *Information sheet West- Siberian railway*. 2018. P. 4 (in Russian).