

Структура и алгоритмы управления энергосберегающих компенсационных преобразователей

А.С. Плехов¹, В.Г. Титов², К.А. Бинда², Д.Ю. Титов²

¹ООО «Энергосбережение», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

²ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,

г. Нижний Новгород, Российская Федерация

E-mail: aplehov@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Компенсационные преобразователи, позволяющие обеспечить управление потоком реактивной энергии на зажимах потребителя, в течение многих лет изучаются в целях разработки оптимальной структуры, расчета их реактивных элементов, определения коммутационных потерь мощности, статических характеристик и энергетических показателей. При этом остаются открытыми вопросы построения таких преобразователей и синтеза алгоритмов управления ключевыми приборами преобразователей, обеспечивающими максимальное использование установленного силового оборудования с учетом мощности искажения и потребляемой активной мощности.

Материалы и методы исследования: В качестве объекта исследования выбран компенсационный преобразователь – выпрямитель или инвертор, ведомый сетью, связанный с нагрузкой постоянного тока, например звеном постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты. При расчетах выбраны параметры преобразователя, характерные для частотного электропривода средней мощности. Задача управления поставлена как задача оптимального использования установленной мощности преобразователя. Исходными данными для получения аналитических зависимостей мощности искажения от углов фазового управления ключевыми приборами компенсационных преобразователей приняты результаты спектрального моделирования работы таких преобразователей под управлением различных алгоритмов. Аналитические зависимости получены методами множественной регрессии.

Результаты: Описаны различные схемы компенсационных преобразователей, предложены алгоритмы их работы, обеспечивающие решение поставленной задачи управления. Получены выражения для ограничений реактивной мощности преобразователя, обусловленных собственной генерацией высших гармоник. Разработаны схемы вычисления углов управления ключами преобразователей.

Выводы: Динамическое управление реактивной мощностью, генерируемой в питающую сеть, позволяет решить задачи энергосбережения в узле нагрузки. Однако использование компенсационных преобразователей требует сопутствующих мероприятий для уменьшения искажений формы сетевого напряжения. Сетевой активный фильтр гармоник в комплексе с компенсационным преобразователем можно рассматривать как активно-адаптивное устройство нижнего уровня интеллектуальных сетей электроснабжения.

Ключевые слова: узел нагрузки электрической сети; потери энергии при электропотреблении; компенсационные преобразователи; алгоритмы управления.

Structure and Algorithms of Control of Energy Saving Compensation Converters

A.S. Plekhov¹, V.G. Titov², K.A. Binda², D.Yu. Titov²

¹ООО "Energoberezhnie", Nizhny Novgorod, Russian Federation

² Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

E-mail: aplehov@mail.ru

Abstract

Background: The compensation converters, allowing to provide stream control of jet energy on clips of the consumer, have been studied for many years for development of optimum structure, calculation of their jet elements, definition of switching losses of power, static characteristics and power indicators. Thus, there are free-answered questions about creation of such converters and synthesis of control algorithms by key devices of the converters, providing the maximum use of the installed power equipment taking into account the power of distortion and the consumed active power.

Materials and methods: The research object is the compensation converter, the rectifier or the inverter conducted by a network, connected with loading of a direct current, for example, a link of direct current of the two-tier converter of frequency. For calculating converter parameters characteristic for the frequency electric drive of average power are chosen. The problem of control is a problem of optimum usage of rated capacity of the converter. Basic data for obtaining analytical dependences of power of distortion from corners of phase management of key devices of compensation converters accepted results of spectral modeling of operation of such converters under control of various algorithms. Analytical dependences are received by methods of multiple regression.

Results: Various schemes of compensation converters are described, the operation algorithms providing the solution to control object are offered. Expressions for restrictions of converter jet power, the highest harmonicas caused by own generation are received, the calculation schemes of control corners are developed with converters keys.

Conclusions: The dynamic control of jet power, produced into the supply network allows to solve the energy saving problems in load noad. However, the usage of compensation converters demands the accompanying actions for reduction of distortions of mains voltage form. The network active filter of harmonics in complex with the compensation converter can be considered as the active and adaptive device of the bottom level of intellectual networks of power supply.

Key words: load node of electric network; energy losses in electrical consumption; compensation converters; control algorithms.

Технологические процессы на предприятиях невозможно осуществлять без использования выпрямителей и электроприводов. Для последних в настоящее время получили распространение двухзвенные преобразователи частоты с неуправляемым выпрямителем и инвертором напряжения на выходе, несмотря на невозможность осуществления рекуперативного режима работы. Широко применяемые ранее преобразователи частоты с инверторами тока без широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с питанием от управляемых вентильных преобразователей (УВП) на основе однооперационных тиристоров являются не только инерционными устройствами, но и потребителями реактивной мощности. Компенсация реактивной мощности, потребляемой УВП, затруднительна и часто малоэффективна ввиду высокого быстродействия этих устройств. Можно строить преобразователи, работа которых основывается на сочетании искусственной и естественной коммутации вентилей. Регулирование этих устройств возможно с поддержанием угла сдвига основной гармоники тока нагрузки $I_{(1)}$, соответствующего значению $\cos\varphi_{(1)} = 1$, в связи с чем их принято называть компенсированными. Применение искусственной коммутации дает возможность изменять характер потребляемой реактивной мощности и на этой основе строить активно-адаптивные устройства систем энергосберегающего электропотребления.

Использование искусственной коммутации в целях повышения энергетических показателей управляемых выпрямителей определило создание научного направления, которое сформировалось благодаря работам Г.И. Бабата, И.Л. Каганова, И.М. Чижено, А.И. Зайцева, А.В. Баева, С.Р. Глинтерника, Г.Г. Магазинника и др.

Принципы построения и управления УВП с искусственной коммутацией могут быть перенесены на область преобразовательных схем, выполняемых на полностью управляемых приборах, которые в настоящее время используются в силовой преобразовательной технике. В случае применения в качестве силовых элементов компенсационного преобразователя IGBT-транзисторов или GTO и IGCT-тиристоров диапазон регулирования расширяется, не снижается быстродействие преобразователя в области низких напряжений, но необходимо ограничивать перенапряжения на силовых вентильях.

Мощные схемы полностью управляемых преобразователей в целях эффективного ог-

раничения перенапряжений и уменьшения массогабаритных показателей защитных цепей целесообразно оснащать фильтрами на основе полярных конденсаторов [1]. Схема мостового преобразователя на силовых транзисторах изображена на рис. 1. Данный преобразователь оснащен устройством, состоящим из маломощного неуправляемого выпрямителя на диодах VD1–VD6, катодного Сф1 и анодного Сф2 фильтров, вспомогательных транзисторов VT7 и VT8 и диодов VD7 и VD8.

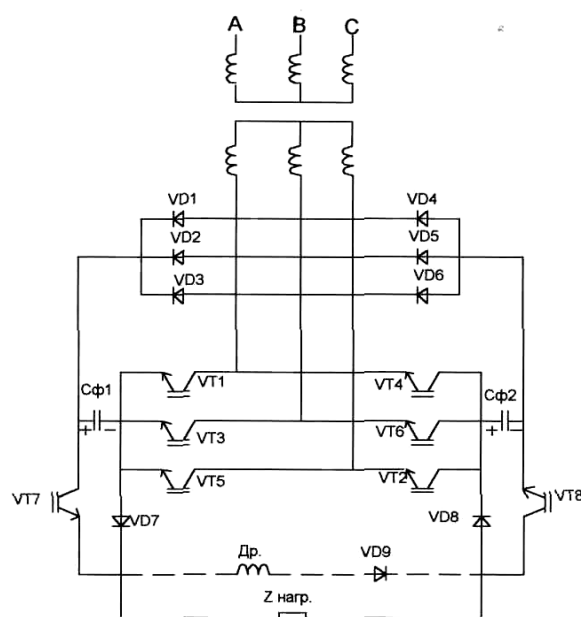


Рис. 1. Принципиальная схема компенсационного преобразователя

Аналитическое исследование переходных и установившихся процессов в компенсационных преобразователях на основе использования метода фазовых переменных [2] позволило определить зависимость мощности потерь в конденсаторе фильтра при разном числе циклов «заряд–разряд». В наиболее оптимальном режиме коммутация протекает в два этапа. Коммутация начинается плавно под воздействием разности напряжений на обкладках конденсатора и коммутирующей ЭДС и не требует для своего начала прерывания полного тока, протекающего через вентиль. На первом этапе часть энергии, накопленной в конденсаторе, отдается в контур коммутации, что сопровождается неполным разрядом конденсатора под воздействием тока вступающей в работу фазы. Лишь после некоторого уравнивания коммутирующих токов конденсатор переключается в цепь выходящей из работы фазы. После чего

начинается второй этап коммутации, в течение которого конденсатор получает энергию, заряжаясь вновь до исходного уровня. Таким образом, на обоих указанных этапах конденсатор фильтра кроме ограничения перенапряжений выполняет функции принудительного перевода тока нагрузки из фазы с большим напряжением в фазу с меньшим напряжением сети. Предложенное техническое решение придает преобразователям отмеченные положительные свойства независимо от того, на какой элементной базе выполняется его силовая схема.

Значения углов управления вентилями активного компенсационного выпрямителя (КВ) диктуются механической нагрузкой на электродвигатель, при этом компенсационный преобразователь генерирует реактивную мощность в сеть «по остаточному принципу».

Вместе с тем уровень генерируемой в распределительную сеть реактивной мощности емкостного характера требует непрерывной коррекции из-за постоянного изменения нагрузки электроприемников, включенных параллельно на эту сеть, о чем свидетельствуют изменения мгновенного значения напряжения в сети.

Нами предложены два способа решения этой проблемы [3]:

1) использовать раздельное управление углами α_e и α_n вентилях групп, работающих соответственно при естественной и принудительной коммутации. В этом случае на выходе двухзвенного преобразователя частоты может быть использован инвертор любого типа, включая классический без дополнительной модуляции;

2) применять наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения звена постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты посредством изменения угла управления α_n КВ также и регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством ШИМ, изменяя степень регулирования $\gamma_{ШИМ}$.

Упрощенная принципиальная схема двухзвенного преобразователя частоты с компенсационным выпрямителем на полностью управляемых вентилях (IGC-тиристорах VS1–VS6) представлена на рис. 2. Емкостные

элементы $X_{c1,2,3}$, включенные на входе компенсационного преобразователя параллельно линейным напряжениям источника питания, являются чувствительными элементами для датчиков системы управления потоками реактивной мощности между узлом нагрузки и компенсационным выпрямителем, построенной на основе обработки векторных сигналов U_c и I_c . В свою очередь, потоки реактивной мощности зависят от режима управления вентилями компенсационного выпрямителя.

Режим управления ключевыми приборами компенсационного преобразователя (КП) будет определять и его возможности, а значит, и сферу применения. Например, наличие ключей S1,2,3 позволяет использовать установленную мощность преобразователя при неработающем электроприводе для динамического управления реактивной мощностью в узле нагрузки, рассматриваемом в качестве нижнего уровня SMART Grid.

Как показано в [4], при использовании большинства режимов управления компенсационные выпрямители имеют преимущество по сравнению с широтно-импульсно управляемыми активными выпрямителями по динамическим потерям в ключах и по степени использования установленной мощности преобразователя.

Такие подходы позволяют решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Компенсация реактивной мощности является одной из форм влияния рассматриваемых преобразователей на сеть. Это влияние зависит от степени регулирования выпрямленного напряжения на выходе звена постоянного тока. Изменением управления в координатах α_e и α_n в допустимой для них области можно обеспечить обоснованное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах, которые зависят от технологической загрузки двигателя и установленной мощности компенсационного выпрямителя.

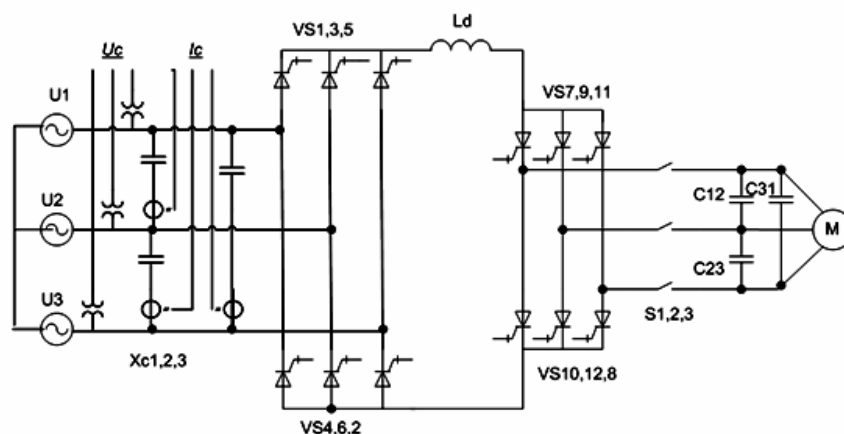


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема двухзвенного преобразователя частоты с компенсационным преобразователем

Задача управления рассматриваемыми системами электроприводов – найти оптимальное соотношение между значениями углов управления α_e и α_i в первом случае:

$$\min(tg\varphi_{сети}) = \min_{\alpha_e, \alpha_i} \left(\frac{Q_{сети} - Q_{КВ}}{P_{КВ}} \right). \quad (1)$$

Во втором случае следует определить оптимальные значения угла управления α_i вентилями компенсационного выпрямителя и степенью широтно-импульсной модуляции тока инвертора $\gamma_{ШИМ}$, составляющие

$$\min(tg\varphi_{сети}) = \min_{\alpha_i, \gamma_{ШИМ}} \left(\frac{Q_{сети} - Q_{КВ}}{P_{КВ}} \right), \quad (2)$$

где $Q_{КВ}$ и $P_{КВ}$ – реактивная и активная мощность компенсационного выпрямителя. Под управлением устройства оптимизации обеспечивается достижение указанных целевых функций.

Одним из основных недостатков вентиляльных регулируемых компенсированных преобразователей является значительное содержание в кривой тока высших гармонических составляющих.

Мощность искажений, определяемая высшими гармоническими составляющими тока, должна быть учтена при нахождении допустимых величин активной и реактивной мощностей, потребляемых из сети.

В схеме КВ с искусственной коммутацией обеих групп вентилях сетевой ток может содержать существенные по величине 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю и 17-ю гармоники. Многие авторы, в том числе [5], отмечают, что мощность искажения есть всегда и мало зависит от угла управления преобразователем. Зависимости для коэффициента искажения тока как преобразователей с естественной, так и преобразователей с искусственной коммутацией вентилях известны, например [5]. Однако следует принять во внимание, что высшие гармонические составляющие трудно учитывать, они более подвержены влиянию случайных факторов из-за колебаний напряжения сети и нагрузки.

Даже при синусоидальном периодическом изменении активной проводимости нагрузки появляются «неканонические» гармоники [6]. Например, если мощность потребителя регулируется с частотой ω_p , которая значительно меньше частоты сети ω , то при этом для сети изменяется проводимость нагрузки $Y(t)$ по отношению к ее среднему значению Y_0 :

$$Y(t) = Y_0[1 + \sin(\omega_p t)] \mid \omega_p \ll \omega.$$

Тогда при активной мощности $P = 3U_c^2 Y_0$, потребляемой такой нагрузкой, из сети будет потребляться полная мощность $S = 3U_c I = 3 \cdot 1,22 \cdot U_c^2 Y_0$. То есть нестационарные процессы даже в линейных цепях приводят к появлению несинусоидальных токов и напряжений, которые содержат дополнительные гармоники, с частотой, некратной частоте сети.

Точное описание искажения тока регулярными функциями не имеет смысла и практически невозможно. Для характеристики качества преобразования тока достаточно грубых регрессионных оценок. В качестве такой оценки удобно использовать $THD\%$ (Total Harmonic Distortion (суммарное гармоническое искажение)):

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=\infty} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}} 100\%, \quad (3)$$

где $I(k)$ и $I(1)$ – действующие (или амплитудные) значения k -й и 1-й гармоник тока.

Стандартом России ГОСТ 13109-97 нормируются значения коэффициента несинусоидальности K_u по напряжению и отдельных гармоник напряжения в электрических сетях трехфазного и однофазного тока общего назначения:

$$K_u = (I(1)/I) 100 \%,$$

где I – действующее значение тока фазы.

THD и K_u в относительных единицах ($THD_{о.е.}$ и $K_{u о.е.}$) связаны следующим соотношением [5]:

$$THD_{о.е.} = \frac{\sqrt{1 - K_{u о.е.}^2}}{K_{u о.е.}}. \quad (4)$$

Мощность искажения T с учетом (4):

$$\begin{aligned} T &= UI \sqrt{1 - K_{u о.е.}^2} = S_{(1)} \frac{1}{K_{u о.е.}} \sqrt{1 - K_{u о.е.}^2} \\ &= S_{(1)} \sqrt{\frac{1}{K_{u о.е.}^2} - 1} = S_{(1)} THD_{о.е.}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $S_{(1)} = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2}$ – полная мощность первой гармоники тока и напряжения.

По данным моделирования зависимости $THD_{о.е.}$ от углов управления разными группами вентилях α_e и α_i были определены уравнения регрессии при соотношении индуктивности нагрузки к индуктивности питающей сети [7]:

$$\frac{L_{нагрузки}}{L_{фазы}} = n \cdot 10^3, \quad n = 0, 1; 1, 0; 10.$$

При изменении соотношения индуктивности в звене постоянного тока $L_{нагрузки}$ к индуктивности питающей сети $L_{фазы}$ на два десятичных порядка вариация параметров линейной регрессии не превышает 14 %.

При раздельном управлении вентилями групп преобразователя, работающих при естественной и принудительной коммутации, от углов коммутации соответственно α_e и α_i зависят и величины потребляемой активной и реактивной мощности, а также мощность искажения, определяемая $THD_{о.е.}$. Для первой схемы предельная реактивная мощность может быть вычислена согласно зависимости

$$Q_{(1)} = \sqrt{S_{уст}^2 - P_{(1)}^2} - S_{уст}^2 * THD_{о.е.}(\alpha_u, \alpha_e). \quad (6)$$

С применением второго метода построена схема с компенсационным преобразователем, все вентили которого принудительно коммутируются с углом управления α_u . Для этой схемы электропривода с компенсационным преобразователем и автономным инвертором тока с ШИМ, питающим электродвигатель, предельная реактивная мощность определяется согласно зависимости

$$Q_{(1)} = \sqrt{S_{уст}^2 - P_{(1)}^2 - S_{уст}^2 * THD_{о.е.}(\alpha_u)}. \quad (7)$$

Активные потери во вторичных цепях преобразователя также должны быть учтены:

$$Q_{(1)} = \sqrt{S_{уст}^2 - P_{(1)}^2 - (S_{уст} * THD_{о.е.}(\alpha_u))^2 - \Delta P^2}. \quad (8)$$

Таким образом, из приведенных выражений $Q_{(1)} = f(\alpha_u)$ и $Q_{(1)} = f(\alpha_u, \alpha_e)$ можно определить возможную генерируемую реактивную мощность и соответствующие углы управления ключевыми приборами компенсационных преобразователей. Наиболее важным результатом обсуждаемых исследований являются полученные аналитические соотношения между углами управления вентилями преобразователей α_e и α_u и величинами $THD_{о.е.}$, характеризующими одновременно генерируемую мощность высших гармонических составляющих. Необходимо также отметить инвариантность полученного выражения (6) по отношению к характеру генерируемой реактивной мощности, которая может иметь и индуктивный характер. Таким образом, КВ может использоваться в качестве динамического реактора для ограничений выбросов напряжения.

Если активные устройства в рассматриваемом узле нагрузки выполнены в виде предложенных нами компенсационных преобразователей, то выражения (6)–(8) можно рассматривать как математические зависимости для определения возможностей активных устройств при построении систем управления энергосбережением. Решение задачи управления компенсационным преобразователем не может считаться выполненным без учета их влияния на показатели электромагнитной совместимости с другими потребителями. Такой учет необходим, поскольку предложенные способы управления компенсационными выпрямителями не обеспечивают синусоидальной формы кривой тока, потребляемого из сети. Вместе с тем расчетные зависимости для $THD_{о.е.}$ от углов управления ключевыми приборами компенсационных преобразователей, приведенные в [4], показывают, что мощность дополнительных устройств, необходимых для компенсации искажений напряжения сети от работы этих преобразователей, не превышает 10 % их установленной мощности. Активные фильтры гармоник в составе преобразователей частоты позволяют снизить отрицательные воздействия рассмотренных технических решений

путем компенсации гармонических составляющих, как высших, так и неканонических.

Рассмотренный комплекс «компенсационный преобразователь – активный фильтр гармоник», по сравнению с активными выпрямителями напряжения и тока, имеет преимущество по динамическим потерям в ключах и по степени использования установленной мощности преобразователя.

Возвращаясь к задаче управления рассматриваемым комплексом, отметим, что алгоритмы управления активным фильтром гармоник можно разделить на две группы:

- 1) алгоритмы, основанные на преобразованиях во временной области;
- 2) алгоритмы, основанные на преобразованиях в частотной области.

Результаты имитационного моделирования показали одинаковые возможности использования указанных алгоритмов в системах управления активными фильтрами гармоник, реализованных как на основе автономных инверторов напряжения, так и на основе автономных инверторов тока [8].

Заключение

Электроприемники с компенсационными выпрямителями, в том числе частотно-регулируемый электропривод переменного тока с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока преобразователя частоты, являются устройством компенсации реактивной мощности, устанавливаемым непосредственно у потребителя. При вычислении углов управления вентилями компенсационного выпрямителя и степени модуляции тока на выходе автономного инвертора необходимо исходить из резервов установленной мощности электрооборудования, принимая во внимание мощность искажения, зависящую от величины U_d при заданной «технологической» активной мощности, например, на валу двигателя электропривода.

Динамическое управление реактивной мощностью, генерируемой в питающую сеть, позволяет решить задачи энергосбережения в узле нагрузки. Однако обеспечение значений показателей качества электрической энергии в допустимых пределах требует сопутствующей компенсации искажений формы сетевого напряжения. Сетевой активный фильтр гармоник в комплексе с компенсационным преобразователем можно рассматривать как активно-адаптивное устройство нижнего уровня интеллектуальных сетей электроснабжения.

Список литературы

1. Патент РФ № 78018. Полупроводниковый компенсатор реактивной мощности / А.И. Зайцев, А.С. Плехов. Оpubл. в Бюл. № 31 10.11.2008 г. МПК H02M 7/48.

2. **Зайцев А.И., Плехов А.С.** Силовая промышленная электроника: учеб. пособие. – Воронеж: Научная книга, 2008. – 252 с.

3. **Зайцев А.И., Плехов А.С., Титов В.Г.** Возможности применения компенсационных преобразователей в звене постоянного тока электроприводов на основе автономного инвертора тока // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. В 5 ч., ч. 4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – С. 23–35.

4. **Титов В.Г., Плехов А.С., Федоров О.В.** Компенсация реактивной мощности в узле нагрузки распределительной сети электроснабжения с помощью средств интеллектуального электропривода // Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 51–56.

5. **Тихомиров В.А., Хватов С.В.** Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород: НГТУ, 2011. – № 3(90). – С. 204–214.

6. **Чаплыгин Е.Е., Калугин Н.Г.** Теория мощности в силовой электронике: учеб. пособие для вузов. – М., 2006. – 56 с.

7. **Плехов А.С. Титов В.Г., Бинда К.А.** Учет мощности искажений при энергосберегающем управлении электроприводами // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. – № 4(91). – С. 203–210.

8. **Алгоритмы** управления активными фильтрами гармоник в составе электроприводов переменного тока / С.М. Дмитриев, А.С. Плехов, В.Г. Титов и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород: НГТУ, 2012. – № 2(95). – С. 206–214.

References

1. Zaytsev, A.I., Plekhov, A.S. *Poluprovodnikovyy kompensator reaktivnoy moshchnosti* [Semiconductor Compensator of Reactive Power]. Patent RF, no. 78018, 2008.

2. Zaytsev, A.I., Plekhov, A.S. *Silovaya promyshlennaya elektronika: uchebnoe posobie* [Power Industrial Electronics: Scholastic Allowance]. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2008. 252 p.

3. Zaytsev, A.I., Plekhov, A.S., Titov, V.G. *Vozmozhnosti primeneniya kompensatsionnykh preobrazovateley v zvene postoyannogo toka elektroprivodov na osnove avtonomnogo invertora toka* [Application Possibilities of Compensation Converters in Section of Direct Current Electrical Drive on base of the Autonomous Current Inverter]. *Izvestiya TuGU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, issue 3, part 4, pp. 23–35.

4. Titov, V.G., Plekhov, A.S., Fedorov, O.V. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v uzle nagruzki raspredelitel'noy seti elektrosnabzheniya s pomoshch'yu sredstv intellektual'nogo elektroprivoda* [Reactive Power Compensation in Load Node of Distributing Energy Supply Network by means of Intellectual Electrical Drive Facilities]. *Promyshlennaya energetika*, 2012, no. 5, pp. 51–56.

5. Tikhomirov, V.A., Khvatov, S.V. *Sravnitel'nyy analiz garmonicheskogo sostava setevogo toka upravlyayemykh vypryamiteley i preobrazovateley chastoty* [Comparative Analysis of Harmonious Structure of Network Current of Operated Rectifiers and Frequency Converters]. *Trudy NGTU*, 2011, no. 3(90), pp. 204–214.

6. Chaplygin, E.E., Kalugin, N.G. *Teoriya moshchnosti v silovoy elektronike: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Power Theory in Power Electronics: scholastic allowance for high school]. Moscow, 2006. 56 p.

7. Plekhov, A.S., Titov, V.G., Binda, K.A. *Uchet moshchnosti iskazheniy pri energosberegayushchem upravlenii elektroprivodami* [Power Account of Distortion under Electrical Consumption Control by Electrical Drive]. *Trudy NGTU*, 2011, no. 4(91), pp. 203–210.

8. Dmitriev, S.M., Plekhov, A.S., Titov, V.G., Titov, D.Yu., Yashin, S.N. *Algoritmy upravleniya aktivnymi fil'trami garmonik v sostave elektroprivodov peremennogo toka* [Control Algorithms of Harmonica Active Filters as a part of Electrical Drive of Alternating Current]. *Trudy NGTU*, 2012, no. 2(95), pp. 206–214.

Плехов Александр Сергеевич,

ООО «Энергосбережение» (Н. Новгород),

генеральный директор, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов,

телефон (831) 4-36-17-68,

e-mail: aplehov@mail.ru

Титов Владимир Георгиевич,

ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования судов,

телефон (831) 4-36-17-68.

Бинда Кирилл Андреевич,

ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,

аспирант кафедры электрооборудования судов,

телефон (831) 4-36-17-68.

Титов Дмитрий Юрьевич,

ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,

аспирант кафедры электрооборудования судов,

телефон (831) 4-36-17-68.