

**ESTIMATION OF INTEGRAL CHARACTERISTICS OF ENERGY CONSUMPTION
IN MARINE POWER SYSTEMS WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS****V. M. Prikhodko, I. V. Prikhodko**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The article shows that the analysis of power consumption in marine power systems with semiconductor converters, it is necessary to consider these properties as a large number of switching valves on the period of work, the presence of time intervals in the period of operation of the marine power systems for which the system components are disconnected from each other, distortion of currents and voltages variable nature of the intensity of the transformation of electricity into other forms. In ship operational conditions of the above properties of semiconductor converters lead to non-linear characteristics of the marine power systems and the need to consider such systems as nonlinear circuits with valves. Provided that for the purpose of evaluating the effectiveness of generating electrical energy, its consumption and conversion to linear marine power systems are widely used concepts of reactive, active and apparent power, which have strict physical meaning. It is confirmed that when evaluating the energy characteristics of the marine power systems with semiconductor converters transfer the formal mathematical apparatus developed for linear power circuits, in some cases leads to incorrect results and does not reflect the real physical processes. The energy characteristics of the marine power systems with semiconductor converters, the definition of which is based on adequate mathematical apparatus.

The most common notion of the integral of reactive power for nonlinear power systems. Presents qualitatively different approach to the analysis of energy processes in nonlinear electric systems, based on the rating curve of the instantaneous power that contains sufficient information about the physical processes. Revealed that is a promising method for the assessment of energy processes in marine power systems with non-sinusoidal currents and voltages through the concept of exchange energy, reflecting the intensity of the physical processes of the exchange of electromagnetic energy between separate parts of an electric circuit. The evaluation of correctness of the use of different methods of calculating reactive power. It is established that the method of determining exchange and reactive energy exchange processes reflect the real physical processes, reveals the contradictions and the errors of the formal approach.

Keywords: ship electric power systems, semiconductor converters, reactive power, integrated features, exchange energy, exchange power, electricity.

For citation:

Prikhodko, Valentin M., and Irina V. Prikhodko. "Estimation of integral characteristics of energy consumption in marine power systems with semiconductor converters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 838–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848.

УДК 629. 12. 066**ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ
В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ****В. М. Приходько, И. В. Приходько**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Доказано, что при анализе электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями необходимо учитывать такие их свойства, как большое число переключений вентилей на периоде работы, наличие интервалов времени на периоде работы судовых электроэнергетических систем, в течение которых элементы системы отключены друг от друга, искажения токов

и напряжений, переменный характер интенсивности преобразования электроэнергии в другие виды. В судовых эксплуатационных условиях перечисленные свойства полупроводниковых преобразователей приводят к нелинейным характеристикам судовых электроэнергетических систем и необходимости рассмотрения таких электросистем, как нелинейные цепи с вентилями. Показано, что с целью оценки эффективности генерирования электрической энергии, её потребления и преобразования в линейных судовых электроэнергетических системах широко применяются понятия реактивной, активной и полной мощностей, которые имеют строгий физический смысл. Подтверждено, что при оценке энергетических характеристик судовых электроэнергетических систем с полупроводниковыми преобразователями формальный перенос математического аппарата, разработанного для линейных электроэнергетических цепей, в ряде случаев приводит к ошибочным результатам и не отражает реальные физические процессы. Рассмотрены энергетические характеристики судовых электроэнергетических систем с полупроводниковыми преобразователями, определение которых основано на адекватном им математическом аппарате.

Приведены наиболее распространённые понятия интегральной реактивной мощности для нелинейных электроэнергетических систем. Представлен качественно новый подход при анализе энергетических процессов в нелинейных электросистемах, основанный на оценке кривой мгновенной мощности, содержащей достаточно полную информацию о физических процессах. Выявлено, что перспективным является метод оценки энергетических процессов в судовых электроэнергетических системах с несинусоидальными токами и напряжениями посредством понятия обменной энергии, отражающего интенсивность физических процессов обмена электромагнитной энергией между отдельными частями электрической цепи. Проведена оценка корректности использования различных методов расчета реактивной мощности. Установлено, что метод определения обменной и реактивной энергии на базе обменных процессов отражает реальные физические процессы, позволяет вскрыть существующие противоречия и исключить ошибки формального подхода.

Ключевые слова: судовые электроэнергетические системы, полупроводниковые преобразователи, реактивная мощность, интегральные характеристики, обменная энергия, обменная мощность, электропотребление.

Для цитирования:

Приходько В. М. Оценка интегральных характеристик электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями / В. М. Приходько, И. В. Приходько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 838–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848.

Введение

Интенсивное развитие судовых электротехнических комплексов и систем, связанное с широким внедрением полупроводниковых преобразователей морского исполнения, а также непрерывное увеличение их установленной мощности обуславливают актуальность выбора оптимальных силовых схем мощных преобразователей, от которых зависят интегральные характеристики электропотребления, электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с питающей судовой сетью и нагрузкой, возрастание добавочных потерь, сбой в работе устройств синхронизации, автоматики, вычислительной техники и систем управления.

Как известно, выбор структур силовых схем полупроводниковых преобразователей определяет область их использования и целесообразность применения в судовых электроэнергетических системах при решении конкретных задач, например, для питания электроприводов, заряда аккумуляторных батарей или электроснабжения судовой силовой нагрузки общего назначения, а также в системах катодной защиты корпусов морских судов от коррозии. Среди различных типов судовых полупроводниковых преобразователей наиболее эффективны многофазные преобразователи, обеспечивающие повышенную кратность частоты пульсации выходного напряжения в отличие от традиционной трехфазной мостовой схемы, принятой на судах различного назначения в качестве базовой схемы преобразования. Применение многофазных или многополюсных полупроводниковых преобразователей считается одним из наиболее эффективных методов уменьшения влияния мощных преобразователей на питающую судовую сеть и нагрузку, а также обеспечения оптимальных интегральных характеристик электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями.

В рыночной экономике получило развитие новое направление построения схем выпрямления, обладающих улучшенными технико-экономическими показателями, обеспечивающими оптимальные интегральные характеристики электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями. Среди схемных решений полупроводниковых преобразователей определенный интерес представляют технические решения выпрямительных агрегатов, эффективность работы которых исследована методами математического моделирования в MS и / или Matlab в работе [1], обеспечивающих повышенную кратность частоты пульсации выходного напряжения с помощью интегрированных трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ).

Поскольку полупроводниковые преобразователи представляют собой комплекс силовых трансформаторов и полупроводниковых коммутаторов, уменьшение влияния судового преобразователя на питающую сеть и повышение качества выходного напряжения достигается за счет использования многофазных трансформаторов. Сравнительный анализ [1] позволил выделить несколько характерных принципов формирования согласующим трансформатором многофазной системы напряжений, необходимой для работы блока силовых вентилей: применение двухфазного базиса (схемы Скотта), использование трехфазного базиса и различных схем соединения секций обмоток, а также внедрение явления вращающегося магнитного поля.

Современные достижения в области трансформаторостроения и преобразовательной техники позволяют создавать интегрированные многопульсные выпрямительные агрегаты, которые могут удовлетворять возросшие в настоящее время требования к электромагнитной совместимости между различными потребителями электрической энергии и питающей сетью. В работах [2], [3] установлено, что способ повышения эффективности управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП) за счет использования нескольких круговых обмоток позволяет уменьшить коэффициент пульсаций выпрямителя с двумя трехсекционными круговыми обмотками до 2,25 %, а с двумя 15-секционными круговыми обмотками — до 0,13 %. На основе анализа принципов построения ТПЧФ, а также отечественных и зарубежных разработок в [1] – [3] выделены конструктивные преимущества ТВМП по сравнению с другими рассмотренными типами ТПЧФ: произвольная фазность выходной системы напряжений, высокая степень симметрии обмоток отдельных фаз при любой фазности полупроводникового преобразователя.

Анализ существующих в настоящее время схемных решений многопульсных полупроводниковых выпрямителей, обеспечивающих повышенную кратность частоты пульсации выходного напряжения посредством интегрированных ТПЧФ, позволяет сделать заключение, что наибольшее распространение получили несколько принципов построения ТПЧФ, основанных на использовании двухфазного базиса (схемы Скотта), трехфазного базиса и замкнутых или разомкнутых схем соединения секций обмоток, а также явление вращающегося магнитного поля. В рыночных экономических условиях повышена эффективность полупроводниковых преобразователей, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями, за счет совершенствования силовых схем преобразователей и алгоритмов управления силовыми ключами полупроводниковых коммутаторов, переключающих отводы выходных круговых обмоток трансформаторов с вращающимися магнитными полями, что подтверждается работой [3].

Методы и материалы

В настоящее время значительное повышение роли судовой преобразовательной техники (выпрямителей, тиристорных преобразователей постоянного тока, инверторов, полупроводниковых преобразователей частоты, тиристорных преобразователей постоянного напряжения) как основы совершенствования существующих традиционных и создания качественно новых инновационных технологий привело к массовому использованию на судах преобразовательных устройств в составе судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) и автоматизированных гребных электрических установок (ГЭУ). При анализе электропотребления в СЭЭС и ГЭУ с по-

полупроводниковыми преобразователями требуется учитывать такие их свойства, как большое число переключений вентиля в период работы T , наличие интервалов времени в период работы СЭЭС, в течение которых элементы системы отключены друг от друга, наблюдаются искажения токов и напряжений, переменный характер интенсивности преобразования электрической энергии в другие виды. На судах морского, речного и рыбопромыслового флотов перечисленные свойства полупроводниковых преобразователей обуславливают нелинейные характеристики СЭЭС и ГЭУ с преобразователями и необходимость рассмотрения таких электросистем как нелинейных цепей с вентилями.

На судах при анализе энергетических характеристик в СЭЭС и ГЭУ с полупроводниковыми статическими преобразователями формальный перенос математического аппарата, разработанного для линейных электрических цепей, в ряде случаев приводит к ошибочным результатам и не отражает реальные физические процессы. Таким образом, разделение энергии, поступающей от судовых генераторов, на активную, реактивную и другие составляющие для электрических систем с полупроводниковыми преобразователями оказывается неэффективным. Поэтому экономически целесообразно рассмотреть энергетические характеристики СЭЭС и ГЭУ с полупроводниковыми преобразователями, определение которых основано на адекватном математическом аппарате.

В работе [4] выявлено, что развитие судовой преобразовательной техники и все более широкое применение частотно-регулируемых электроприводов на судах обуславливают необходимость проведения измерений в электрических сетях с несинусоидальными токами и напряжениями. В таких судовых электрических сетях измерение тока, напряжения, полной мощности и её активной и реактивных составляющих сопряжено с рядом технических и методических трудностей [5].

В частности, в цепях преобразователей частоты для питания линейных асинхронных электродвигателей морского исполнения частота изменяется от 0 до 50 Гц при основном диапазоне регулирования 0 – 5 Гц. Причем скорость регулирования частоты соизмерима с длительностью периода несинусоидального тока и напряжения. В этих условиях на судах не могут быть применены традиционные способы измерения составляющих полной мощности. В СЭЭС с полупроводниковыми преобразователями частоты широкий спектр гармонических составляющих в токах и напряжениях приводит к тому, что существует трудность регистрации перехода тока (напряжения) через нуль и определения длительности их периода. Поэтому интегральные способы измерения мощности при быстром изменении частоты являются неэффективными в судовых эксплуатационных условиях. В связи с этим необходим такой метод измерения составляющих полной мощности, который позволял бы проводить измерения в темпе изменения частоты в судовых нелинейных цепях, в которых текущее значение частоты неизвестно, а формы кривых тока и напряжения произвольны.

В работе [4] установлено, что измерения составляющих мощности при таких условиях на судах являются возможными. Известно, что если в синусоидальной цепи ток и напряжение совпадают по фазе, то реактивная составляющая мощности равна нулю, а кривая мгновенной мощности $p = ui$ не заходит в область отрицательных значений p . Когда угол между током и напряжением равен 90° , реактивная мощность равна полной, а кривая мгновенной мощности $p = ui$ симметрична относительно нулевой оси. Таким образом, мерой реактивной мощности могут являться степень смещения кривой мгновенной мощности относительно нуля и её амплитуда.

На судах контроль величины активной и реактивной мощности в цепях регулируемых статических преобразователей частоты необходимо производить по интегральным значениям положительной и отрицательной составляющих сигнала мгновенной мощности. В качестве меры реактивной мощности может быть принята степень смещения сигнала мгновенной мощности относительно нулевой оси, что выражается через отношение сигналов положительной и отрицательной составляющих мгновенной мощности.

Автором научной монографии [6] определены параметры компенсаторов реактивной мощности, представляющих собой фактически параметрические оптимизаторы, содержащие реактивные элементы, величины которых должны выбираться в зависимости от конкретного стационарного режима. Для статического компенсатора при соединении реактивных элементов по схеме «треугольник» процесс оптимизации состоит в оценке величин трех элементов, доставляющих минимум целевой функции (критерию качества) в форме суммы квадратов линейных токов суммовой трехфазной системы. Для оценки эффективности генерирования электроэнергии, ее потребления и преобразования в линейных системах широко используются понятия реактивной Q , активной P и полной S мощностей. Связь между этими величинами устанавливается соотношением

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad (1)$$

где

$$P = UI \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) = UI \cdot \cos \varphi; \quad (2)$$

$$Q = UI \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i) = UI \cdot \sin \varphi; \quad (3)$$

$S = UI = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}}$; U — действующее значение напряжения; $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_u)$; I — действующее значение тока $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)$; $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$.

Величины P , Q , S имеют строгий физический смысл.

Для синусоидальных функций между интегральными и мгновенными характеристиками существует однозначная связь, поскольку по информации в точке можно установить вид всей функции. Для линейных систем интегральные характеристики (2), (3) несут информацию о мгновенных значениях функций $u(t)$ и $i(t)$. При малых значениях φ изменение величин P и Q приводит к пропорциональному изменению угла φ сдвига фаз между $u(t)$ и $i(t)$. Действительно, при неизменном значении потребляемой активной мощности P угол φ регулируется изменением реактивной мощности Q , так как имеет место соотношение $\varphi = \arctg(Q/P) \approx Q/P$.

Простота составления энергетического баланса (1), отражение реальных физических процессов в линейных системах и связи между интегральными и мгновенными характеристиками привели к переносу понятия ортогональной системы мощностей (1) – (3) на нелинейные цепи с несинусоидальными напряжениями и токами, какими являются системы с преобразователями. При этом ортогональные системы используются не только для оценки характеристик электропотребления, но и для регулирования оптимального электропотребления. Однако, если понятие активной мощности имеет строгий физический смысл, то при распространении понятия реактивной мощности на нелинейные системы теряется ясная связь с физическими процессами в накопителях электромагнитной энергии, появляются затруднения при толковании ряда результатов применения введенной реактивной мощности.

Приведем наиболее распространенные понятия интегральной реактивной мощности для нелинейных систем:

1) интегральная реактивная мощность по Фризе

$$Q_\Phi = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{\sum_k U_k^2 \sum_k I_k^2 - \left(\sum_k P_k \right)^2}; \quad (4)$$

2) интегральная реактивная мощность по Будеану

$$Q_B = \sum_k Q_k = \sum_k U_k I_k \sin \varphi_k, \quad (5)$$

где Q_k — реактивная мощность для k -х гармоник тока и напряжения, совпадающая с мощностью, полученной на основании преобразования Гильберта:

$$H\{f(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{\tau - t} d\tau;$$

3) мощность с использованием значений интеграла по времени от одной из определяющих функций:

$$Q_{\text{и}} = \frac{\omega}{T} \int_0^T \left(\int u dt \right) i dt = - \frac{\omega}{T} \int_0^T \left(\int i dt \right) u dt = \sum_k \frac{1}{k} Q_k; \quad (6)$$

4) мощность с использованием значения производной по времени от одной из определяющих функций:

$$Q_{\text{п}} = \frac{1}{\omega T} \int_0^T u \left(\frac{di}{dt} \right) dt = - \frac{1}{\omega T} \int_0^T i \left(\frac{du}{dt} \right) dt = \sum_k k Q_k; \quad (7)$$

5) обобщенная мощность при применении эквивалентной частоты:

$$Q_o = \frac{\omega}{\omega_s} Q_{\text{п}} = \frac{\omega_s}{\omega} Q_{\text{и}} = \sqrt{Q_{\text{п}} Q_{\text{и}}} = \sqrt{\sum_k Q_k + \sum_{\substack{k, \text{п} \\ k \neq \text{п}}} \frac{k}{\text{п}} Q_k Q_{\text{п}}}; \quad (8)$$

6) реактивная мощность, определяемая на базе средних величин энергии, накопленной в магнитном ($\bar{W}_m$) и электрическом ($\bar{W}_s$) полях:

$$Q_{\text{н}} = UI = 2\omega \left(\bar{W}_m - \bar{W}_s \right); \quad (9)$$

7) реактивная мощность, состоящая из мощностей сдвига и искажения $Q_{\text{и}}$:

$$Q_{\text{си}} = \sqrt{Q_c^2 + Q_{\text{и}}^2}, \quad (10)$$

где

$$Q_c = Q_B; \quad Q_{\text{и}} = \left\{ \sum_{\substack{k, \text{п} \\ k \neq \text{п}}} \left[U_k^2 I_{\text{п}}^2 + U_{\text{п}}^2 I_k^2 - 2U_k I_{\text{п}} U_{\text{п}} I_k \cos(\varphi_k - \varphi_{\text{п}}) \right] \right\}^{1/2}.$$

В ранее выполненных работах представлено различное определение реактивной мощности (формулы (4) – (10)), что привело к разным способам определения баланса энергии на основе ортогональных составляющих. Ортогональные системы, хоть и позволяют оценить долю мощностей, вызванную амплитудной и фазовой асимметрией, и применяются в практических расчетах, в конечном итоге, не могут быть рекомендованы для широкого применения в теоретических и практических расчетах при проведении баланса энергии в системах с преобразователями, поскольку они являются условными расчетными величинами и в общем случае не в полной мере адекватно отражают физические процессы.

В работе [7] получено выражение для действующего значения тока $i(t)$, из которого следует, что компенсация реактивной мощности Фризе аналогична минимизации действующего значения тока, протекающего от судового генератора к нагрузке. Минимизация в СЭЭС с полупроводниковыми преобразователями осуществляется посредством подключения параллельно судовой нагрузке компенсатора с током $i_k(t) = -i_p(t)$. Ортогонализация одной из функций в произведении (u, i) во многих случаях приводит к возможности учета тока $i_p(t)$. На основании такого подхода рассмотрено определение следующих реактивных мощностей: интегральной реактивной мощности по Будеану; мощности с использованием значения производной по времени от одной из определяющих функций напряжения или тока; мощности с использованием значений интеграла по времени от одной из определяющих функций напряжения или тока. Исследования [7] и [8] показали, что реактивная мощность Фризе является наиболее полной из рассмотренных определений реактивных мощностей характеристик энергетических процессов в электроэнергетической системе. В СЭЭС использование реактивных мощностей Фризе $Q_{\text{ф}}$ и $Q_{\text{фт}}$ как критериев оценки дополни-

тельных потерь при передаче, распределении электрической энергии на судах позволяет определить величину этих потерь как в установившихся, так и в переходных режимах.

Работа [9] посвящена исследованиям эффективности применения компенсатора реактивной мощности дискретного типа. Каждая из секций конденсаторов подключается к электрической сети с помощью последовательно соединенных с ними бесконтактных силовых коммутаторов, выполненных на основе мощных IGBT транзисторов. Главной отличительной особенностью разработанного компенсатора реактивной мощности дискретного типа по сравнению с используемыми в настоящее время устройствами является то, что для исключения всплесков тока в конденсаторных батареях при коммутациях подключение конденсаторов к электрической сети происходит не в любой момент времени, а в момент равенства мгновенного напряжения сети и остаточного напряжения на конденсаторах. Оригинальное построение силовой схемы статического транзисторного коммутатора сокращает количество коммутационной аппаратуры при достаточно широком диапазоне регулирования мощности конденсаторной батареи. В работе [9] в результате проведенных исследований получены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать и выбрать параметры статического полупроводникового компенсатора реактивной мощности с учетом характеристик питающей сети. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований для решения проблемы компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах экономически целесообразно применять статический полупроводниковый (транзисторный вместо тиристорного) компенсатор реактивной мощности дискретного типа.

Работы [5] – [11] показывают, что разные способы определения реактивной мощности приводят к различным результатам. Следовательно, применение ортогональных систем не позволяет достаточно точно осуществлять оптимальное регулирование электропотребления в системах с преобразователями, в частности, осуществлять компенсацию энергии, выбор энергетического оборудования, определять энергетические показатели генерирования, преобразования и потребления энергии.

Результаты

Условность и неопределенность понятия реактивной мощности в системах с преобразователями предполагают, что способ ее расчета должен всегда оговариваться. В работах [5], [9] установлено, что такая неоднозначность реактивной мощности в построении ортогональных систем приводит к ограничению их применения при теоретических и экспериментальных исследованиях СЭЭС с полупроводниковыми преобразователями.

Качественно другой подход при рассмотрении энергетических процессов в нелинейных системах основан на анализе кривой мгновенной мощности $p(t)$, содержащей достаточно полную информацию о физических процессах, которые изложены в работах [9] – [11]. Так, в работах [6], [9], [10] дана разносторонняя и глубокая оценка энергетических процессов в нелинейных системах. За счет декомпозиции мгновенной мощности $p(t)$ получены составляющие, отражающие направление передачи потока энергии, и энергетические коэффициенты, позволившие охарактеризовать системы с точки зрения эффективности использования энергии и степени ее уравновешенности. Однако при декомпозиции мгновенной мощности упор сделан на формальное разложение функции $p(t)$, интегральные характеристики и коэффициенты в определенной степени не учитывают реальные физические процессы. Данные характеристики не в полной мере отражают мгновенные процессы, что не позволяет с их помощью учитывать все свойства систем с преобразователями.

Базируясь на идее декомпозиции мгновенной мощности $p(t)$ для отображения характеристик в системе генератор – нагрузка предложено использовать характеристику переменного энергопотока:

$$W(t) - Pt = \int_0^t u(t)i(t)dt - \frac{t}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \quad (11)$$

выделяя при этом из выражения (11) величину $W_{LC}(t)$, отражающую энергию, накапливаемую в электромагнитном поле. Выражение (11) для периодических процессов является избыточным,

так как в этом случае достаточно иметь характеристику энергопотребления только на одном периоде. Предложенный способ анализа взаимодействия между источником и потребителем электроэнергии ориентирован на наличие эквивалентной схемы, не учитывает переменную интенсивность преобразования энергии в другие виды, а также иные особенности систем с преобразователями.

Перспективным является способ оценки энергетических процессов в системах с несинусоидальными токами и напряжениями с помощью понятия обменной энергии, отражающего интенсивность физических процессов обмена электромагнитной энергией между отдельными частями электрической цепи. Если от генератора в нагрузку в течение интервала времени t^+ поступает энергия W^+ , то обменная энергия определяется в виде:

$$W_{об} = W^+ - Pt^+, \quad (12)$$

где t^+ — интервал времени, в течение которого $p(t) = u(t)i(t) > 0$; P — активная (средняя за период) мощность.

Обсуждение

Обменная энергия определена для реактивной нагрузки. Проведена оценка корректности применения различных методов расчета реактивной мощности. Показано, что вычисление реактивной мощности Q на основе обменной мощности $Q_{об} = W_{об} / T(Q - \pi Q_{об})$ позволяет устранить неточности, возникающие при непосредственном использовании выражений (4) – (10). Если коэффициенты несинусоидальности токов и напряжений меньше 5 %, то погрешность определения реактивной мощности по первой гармонике Q_1 по сравнению со значениями Q , найденными через обменную мощность $\delta_1 = (Q - Q_1) \cdot 100 \% / Q$ не превосходит 5 %, а среднее значение $\delta_{ср}$ — 3 – 4 %. Поэтому при уровне значимости, отвечающем интегральной вероятности 95 %, погрешность, равная 5 %, может считаться вполне приемлемой, и при соответствии качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-67 вполне допустимо оценивать значение реактивной мощности по первым гармоникам напряжения и тока. Когда коэффициенты несинусоидальности превышают 5 %, что имеет место в системах с преобразователями, известные интегральные характеристики не отражают реальные процессы в системах с преобразователями.

Способ определения обменной и реактивной энергии на основе обменных процессов отражает реальные физические процессы, позволяет вскрыть существующие противоречия и избежать ошибок формального подхода, что предопределило его значительные потенциальные возможности. Предложенное определение обменной энергии не учитывает переменную интенсивность преобразования электромагнитной энергии в другие виды, а также наличие в период работы системы с преобразователями интервалов времени, в течение которых элементы системы отключены друг от друга. Применение обменной энергии $W_{об}$, согласно выражению (12), в ряде случаев может привести к недопустимым погрешностям.

Интегральные характеристики широко применяются в качестве параметра регулирования электропотребления, например, для компенсации энергии, управления энергетическими процессами в электросистемах, в том числе в судовых, которые рассмотрены в работах [10], [12]. Так, в работе [11] осуществлена практическая проверка возможности резонансных явлений и компенсации гармоник компенсатором на IGBT транзисторах. Рассмотрены особенности резонансных явлений в электроэнергетических системах питания судов с берега с мощными полупроводниковыми преобразователями, вызванных высшими гармониками тока и напряжения, появляющимися в результате работы преобразователей. В работе [12] показано, что выбор силовых транзисторов производится по максимальному напряжению между коллектором и эмиттером и номинальному току через IGBT-транзистор. В разработанном компенсаторе реактивной мощности использованы силовые IGBT-транзисторные модули MITSUBISHI. Доказана возможность установки силовых модулей других производителей [13] – [19], имеющих идентичные основные параметры, как у IGBT-модулей MITSUBISHI.

Однако использование рассмотренных интегральных характеристик в качестве параметра регулирования энергии может оказаться нецелесообразным при наличии в системах резко несинусоидальных токов и напряжений (например, в электросистемах, содержащих дуговые электропечи, электрохимические устройства, электропривод, импульсные устройства и др.). Для цепей с несинусоидальными напряжениями и токами в последнее время разработан ряд алгоритмов компенсации энергии и регулирования ее потребления, основанных на учете реальных процессов энергообмена. Предложенные алгоритмы не позволяют решить в комплексе задачу оптимизации электропотребления в системах с преобразователями — обеспечить не только получение на нагрузке требуемой формы сигналов, но и оптимальные режимы работы как генераторов, преобразователей и нагрузок, так и электросистемы в целом.

Таким образом, разделение энергии, поступающей от генераторов, на активную, реактивную и другие составляющие для систем с преобразователями оказывается нецелесообразным.

Заключение

1. При расчете энергетических характеристик в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями необходимо оперировать кривой мгновенной мощности $p(t)$, учитывать реальные процессы и особенности таких систем.

2. С помощью интегральных характеристик целесообразно оценивать характер протекания электромагнитных процессов, а посредством мгновенных — осуществлять регулирование электропотребления.

3. При подведении баланса энергии в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями необходимо учитывать мгновенные характеристики.

4. Для построения системы коэффициентов эффективности преобразования энергии требуется совместное использование как интегральных, так и мгновенных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Музыка М. М. Исследование эффективности работы управляемых выпрямителей методами математического моделирования в МС и/или Matlab: монография / М. М. Музыка [и др.]; под ред. проф. А. И. Черевко. — Архангельск: САФУ имени М. В. Ломоносова, 2014. — 108 с.

2. Черевко А. И. Качество выходного напряжения выпрямителя, построенного на базе ТВМП, при четном и нечетном числе секций КО ТВМП / А. И. Черевко, М. М. Музыка, С. В. Платоненков [и др.] // Электротехника. — 2012. — № 4. — С. 41–45.

3. Сакович И. А. Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / И. А. Сакович, А. И. Черевко, С. В. Платоненков // Электричество. — 2016. — № 1. — С. 43–49.

4. Гурьев В. В. Валогенераторные установки нового поколения / В. В. Гурьев, А. В. Григорьев // Корабел. — 2013. — № 3 (21). — С. 94–95.

5. Губанов Ю. А. Электроснабжение и электропитание корабельных потребителей: работа по исправлению нагрузки / Ю. А. Губанов, К. В. Жданов, А. Г. Сотников, Д. С. Муликов // Морской вестник. — 2014. — № 1 (49). — С. 43–48.

6. Приходько В. М. Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: монография / В. М. Приходько. — СПб.: СПГУВК, 2013. — 244 с.

7. Приходько В. М. Реактивная мощность как критерий оценки потерь при распределении электроэнергии в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Приходько // IV Международный Балтийский морской форум: материалы форума. — Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. — С. 247–251.

8. Приходько В. М. Критерий оценки потерь при распределении электроэнергии в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Приходько // Региональная информатика (РИ-2016). Юбилейная XV Санкт-Петербургская междунар. конф. «Региональная информатика (РИ-2016)». Санкт-Петербург, 26 – 28 октября 2016 г.: материалы конф. — СПб.: РАН, 2016. — С. 314–315.

9. Приходько В. М. Эффективность компенсатора реактивной мощности дискретного типа / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 68–75.

10. Мелкави Х. Методы и средства комплексных испытаний электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: автореферат дис. на соиск. ... канд. техн. наук / Х. Мелкави. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2012. — 23 с.

11. Приходько В. М. Резонансные явления в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями при питании судов с берега / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 28–34.

12. Приходько В. Транзисторный компенсатор реактивной мощности / В. Приходько, М. Ивлев, И. Приходько // Силовая электроника. — 2017. — Т. 1. — № 64. — С. 65–68.

13. Azuma K. New 3.3-kV IGBT Module with Low Power Loss and High Current Rating / K. Azuma, I. Yoshida, A. Konno, Y. Toyoda, K. Saito // Proc. PCIM Europe. — 2013. — Pp. 345–350.

14. Toyota Y. Novel 3.3-kV Advanced Trench HiGT with Low Loss and Low dv/dt Noise / Y. Toyota, S. Watanabe, T. Arai, M. Wakagi, M. Mori, M. Shinagawa, K. Azuma, Y. Shima, T. Oda, Y. Toyoda, K. Saito // Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2013 25th International Symposium on. — IEEE, 2013. — Pp. 29–32. DOI: 10.1109/ISPSD.2013.6694391.

15. Nagel A. Robustness Requirements on Semiconductors for High Power Applications / A. Nagel, M. M. Bakran // Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 1–9. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631910.

16. Jones P. S. Calculation of Power Losses for MMC-based VSC HVDC Stations / P. S. Jones, C. C. Davidson // Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631955.

17. Application Manual (High voltage IGBT module). — Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd., 2009. — 35 p.

18. Кусима Т. 1800 А/3,3 кВ IGBT-модуль с пазовой структурой затвора Advanced Trench HiGT и оптимизированной конструкцией / Т. Кусима, К. Адзума, Я. Нэмото [и др.] // Силовая электроника. — 2017. — Т. 1. — № 64. — С. 14–18.

19. Хофштёттер Н. Вопросы управления IGBT: однополярное управление, использование внешней емкости затвора / Н. Хофштёттер, П. Бекедадь, А. Колпаков // Силовая электроника. — 2017. — Т. 1. — № 64. — С. 21–26.

REFERENCES

1. Muzyka, M. M., et al. *Issledovanie effektivnosti raboty upravlyaemykh vypryamitelei metodami matematicheskogo modelirovaniya v MC i/ili Matlab: monografiya*. Arkhangel'sk: SAFU imeni N.V. Lomonosova, 2014.

2. Cherevko, A. I., M. M. Muzyka, S. V. Platonenkov, I. A. Sakovich, and I. Yu. Kuz'min. "Kachestvo vykhodnogo napryazheniya vypryamitelya, postroennogo na baze TVMP, pri chetnom i nechetnom chisle sektsii KO TVMP." *Elektrotehnika* 4 (2012): 41–45.

3. Sakovich, I. A., A. I. Cherevko, and S. V. Platonenkov. "Kachestvo vykhodnogo napryazheniya upravlyаемого vypryamitelya na baze transformatora s vrashchayushchimsya magnitnym polem." *Elektrichestvo* 1 (2016): 43–49.

4. Gur'ev, V. V., and A. V. Grigor'ev. "Valogeneratorskiye ustanovki novogo pokoleniya." *Korabel* 3(21) (2013): 94–95.

5. Gubanov, Yu. A., K. V. Zhdanov, A. G. Sotnikov, and D. S. Mulikov. "Elektrosnabzhenie i elektropitanie korabel'nykh potrebiteli: rabota po ispravleniyu nagruzki." *Morskoi vestnik* 1(49) (2014): 43–48.

6. Prihodko, V. M. *Intensifikatsiya kompleksnykh ispytaniy sudovogo jelektrooborudovaniya po jenergosberegajushhej tehnologii v sudostroenii i sudoremonte: nauch. monogr.* SPb.: SPGUVK, 2013.

7. Prihod'ko, V. M., and I. V. Prihod'ko. "Reaktivnaya moshchnost' kak kriterii otsenki poter' pri raspredelenii elektroenergii v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh." *IV Mezhdunarodnyi Baltiiskii morskoi forum: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma*. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2016: 247–251.

8. Prihod'ko, V. M., and I. V. Prihod'ko. "Kriterii otsenki poter' pri raspredelenii elektroenergii v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh." *Regional'naya informatika (RI-2016). Yubileinaya KhV Sankt-Peter-*

burgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Regional'naya informatika (RI-2016)». Sankt-Peterburg, 26-28 oktyabrya 2016 g.: *Materialy konferentsii*. SPb.: RAN, 2016: 314–315.

9. Prihod'ko, V. M., M. L. Ivlev, and I. V. Prihod'ko. "Effektivnost' kompensatora reaktivnoi moshchnosti diskretnogo tipa." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2012): 68–75.

10. Melkaui, H. Metody i sredstva kompleksnykh ispytaniy jelektrooborudovaniya po jenergosberegajushhej tehnologii v sudostroenii i sudoremonte. Abstract of PhD diss. SPb.: FGOUVPO SPGUVK, 2012.

11. Prihod'ko, V. M., M. L. Ivlev, and I. V. Prihod'ko. "The resonant phenomena in electrical power systems with semiconductor converters at platny of vessels from the coast." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3(19) (2013): 28–34.

12. Prihod'ko, V., M. Ivlev, and I. Prihod'ko. "Tranzistornyi kompensator reaktivnoi moshchnosti." *Silovaya elektronika* 1.64 (2017): 65–68.

13. Azuma, K., I. Yoshida, A. Konno, Y. Toyoda, and K. Saito. "New 3.3-kV IGBT Module with Low Power Loss and High Current Rating." *Proc. PCIM Europe* (2013): 345–350.

14. Toyota, Y., S. Watanabe, T. Arai, M. Wakagi, M. Mori, M. Shinagawa, K. Azuma, Y. Shima, T. Oda, Y. Toyoda, and K. Saito. "Novel 3.3-kV Advanced Trench HiGT with Low Loss and Low dv/dt Noise." *Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2013 25th International Symposium on*. IEEE, 2013: 29–32. DOI: 10.1109/ISPSD.2013.6694391.

15. Nagel, Andreas, and Mark M. Bakran. "Robustness requirements on semiconductors for high power applications." *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*. IEEE, 2013: 1–9. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631910.

16. Jones, Phil S., and Colin C. Davidson. "Calculation of power losses for MMC-based VSC HVDC stations." *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*. IEEE, 2013: 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631955.

17. *Application Manual (High voltage IGBT module)*. Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd., 2009.

18. Kusima, T., K. Adzuma, Ya. Nemoto, K. Saito, E. Koike, and V. Rentyuk. "1800 A/3,3 kV IGBT-modul' s pazovoi strukturoi zatvora Advanced Trench HIGT i optimizirovannoi konstruksiei." *Silovaya elektronika* 1.64 (2017): 14–18.

19. Khofstetter, N., P. Bekedal', and A. Kolpakov. "Voprosy upravleniya IGBT: odnopolyarnoe upravlenie, ispol'zovanie vneshnei emkosti zatvora." *Silovaya elektronika* 1.64 (2017): 21–26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Приходько Валентин Макарович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: prihodki-3@yandex.ru, kaf_saees@gumrf.ru

Приходько Ирина Валентиновна —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: prihodki-3@yandex.ru, kaf_upvt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Prihodko, Valentin M. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: prihodki-3@yandex.ru, kaf_saees@gumrf.ru

Prihodko, Irina V. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: prihodki-3@yandex.ru, kaf_upvt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

Received: April 27, 2017.