

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-108-116  
УДК 629.5.035.5-83+621.314

Б.Ф. Дмитриев, С.Я. Галушин, С.А. Согонов, А.Ю. Розов, М.А. Максимова  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРЕБНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

**Объект и цель научной работы.** Управление режимами работы гребного электрического двигателя (ГЭД) осуществляется полупроводниковыми преобразователями частоты, применение которых значительно ухудшает качество электроэнергии на общих шинах судовой электроэнергетической системы (СЭЭС). Основными причинами являются уменьшение коэффициента мощности и появление высших гармоник в потребляемом токе, в результате чего снижается надежность работы потребителей и увеличиваются потери электроэнергии. Поэтому уменьшение указанных негативных последствий является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Используются законы теоретической электротехники, теории мощности.

**Основные результаты.** Рассмотрена и предложена система управления компенсатором реактивной мощности (КРМ) для обеспечения качества электроэнергии, увеличения коэффициента мощности и фильтрации высших гармоник в СЭЭС.

**Заключение.** Для обеспечения качества электрической энергии компенсатора реактивной мощности необходимо использовать современные импульсно-модуляционные алгоритмы управления с прямым микропроцессорным управлением.

**Ключевые слова:** электрическая энергия, качество электрической энергии, преобразователь частоты, активный фильтр, компенсатор реактивной мощности.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-108-116  
UDC 629.5.035.5-83+621.314

B.F. Dmitriev, S.Ya. Galushin, S.A. Sogonov, A.Yu. Rozov, M.A. Maksimova  
St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

## DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM FOR REACTIVE POWER COMPENSATOR OF FREQUENCY CONVERTER FOR CONTROL OF PROPULSION MOTOR

**Object of purpose of research.** The control of the operating modes of the propulsion electric motor (PEM) is carried out by semiconductor frequency converters, the use of which significantly worsens the quality of electricity on the common buses of the Marine Power Systems. The main reasons are a decrease in the power factor and the appearance of higher harmonics in the consumed current. As a result of this, the reliability of consumers' operation decreases, and power losses increase. Therefore, reducing these negative consequences is an urgent task.

**Materials and methods.** Methods of theoretical electrical engineering, power theory were used.

**Main results.** The method of operation of the reactive power control device for ensuring the quality of electricity, increasing the power factor and filtering higher harmonics in Marine Power Systems was considered and proposed.

**Conclusion.** To ensure the quality of electrical energy of the reactive power compensator, it is necessary to use modern pulse-modulation control algorithms with direct microprocessor control.

**Keywords:** electrical energy, quality of electrical energy, frequency converter, active filter, reactive power compensator.  
*The authors declare no conflicts of interest.*

*Для цитирования:* Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Согонов С.А., Розов А.Ю., Максимова М.А. Разработка системы управления компенсатором реактивной мощности преобразователя частоты для управления гребным электродвигателем. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 108–116.

*For citations:* Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Sogonov S.A., Rozov A.Yu., Maksimova M.A. Development of control system for reactive power compensator of frequency converter for control of propulsion motor. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 108–116 (in Russian).

Структуры судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) значительно многообразнее, чем традиционные системы электроснабжения. Кроме того, вопросы проектирования транспортных систем имеют свою специфику, которая учитывает прежде всего критерии эффективности, а также параметры электроэнергии и электромагнитную совместимость оборудования (особенности совместной работы основных функциональных узлов «источник – преобразователь», «преобразователь – преобразователь»), и в связи с этим их оптимизацию [1, 2].

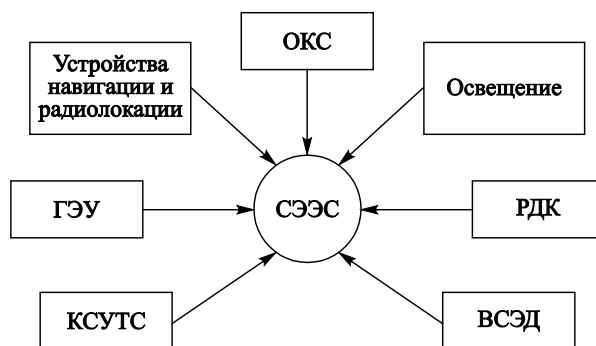
Как известно, структура СЭЭС определяется потребителями электроэнергии (рис. 1), а критериями ее эффективности служат масса, коэффициент полезного действия (КПД), показатели надежности и качества электроэнергии, суммарные затраты, связанные со стоимостью и эксплуатацией. В большинстве случаев критерий массы для транспортных СЭЭС является приоритетным. КПД СЭЭС определяет эффективность преобразования электроэнергии.

При оптимизации СЭЭС критерии массы и КПД противоречивы. Например, с увеличением мощности источника электроэнергии, а значит и массы, повышается его КПД. Основные критерии надежности СЭЭС – интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и наработка до первого отказа [3, 6].

Для современных судов и кораблей созданы эффективные системы электродвижения на основе гребных электрических двигателей (ГЭД) с винторулевой колонкой (ВРК). Они обеспечивают высокую маневренность судов в различных режимах движения. С целью более эффективного использования электрооборудования, ГЭД с ВРК получают электропитание от единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС). Управление режимами работы ГЭД осуществляется полупроводниковыми преобразователями частоты, применение которых значительно ухудшает качество электроэнергии на общих шинах ЕЭЭС.

Энергетические характеристики данного устройства определяются следующими параметрами:

- напряжение сети, к которой подключается устройство компенсации неактивной мощности (КНМ);
- параметры преобразователя частоты, включая трансформатор связи (повышающий трансформатор);
- требуемая величина пускового момента гребного двигателя;
- требуемое время пуска (если необходимо).



**Рис. 1.** Структурная схема взаимосвязи судовой электроэнергетической системы с основными системами судна. Здесь: КСУТС – комплексная система управления технологическими средствами; ГЭУ – гребная энергетическая установка; ОКС – общекорабельные системы; РДК – резервно-двигательный комплекс; ВСЭД – вспомогательная система электродвижения

**Fig. 1.** Block diagram of ship electric power system interaction with main ship systems. Here: КСУТС – integrated equipment control system; ГЭУ – propulsion plant; ОКС – general-purpose ship system; РДК – reserve propulsion unit; ВСЭД – auxiliary electric propulsion system

Устройство компенсации неактивной мощности (КНМ) преобразователя частоты для управления гребным электродвигателем (ГЭД) пропульсивного движения состоит из компенсатора реактивной мощности (КРМ), предназначенного для компенсации реактивной мощности на основной частоте, и активного фильтра тока нагрузки, который компенсирует мощность высших гармоник. Такое устройство содержит полупроводниковый преобразователь напряжения, являющийся системой с широтно-импульсной модуляцией выходных параметров – токов и напряжений. Поэтому функционирование компенсатора связано с необходимостью управления динамическими и статическими электромагнитными процессами, характерными для импульсных систем [11, 12].

Эффективность и надежность работы устройства КРМ во многом определяются параметрами его системы управления. С развитием информационных технологий системы управления совершенствуются и упрощается процесс их разработки. Для управления компенсатором реактивной мощности преобразователя частоты устройства ГЭД была разработана микропроцессорная система управления, позволяющая обеспечить высокое качество регулирования и адаптивность к изменяющимся внешним условиям работы. Микропро-

цессорная система позволяет обеспечить требуемое быстродействие, точность и эффективность работы КРМ [9].

При проектировании СЭЭС необходимо учитывать условия работы (прежде всего климатические) и особенности эксплуатации (повышенные динамические и вибрационные нагрузки), а также проблему электромагнитной совместимости устройств из-за компактного размещения оборудования [1, 2].

От параметров электроэнергии зависят характеристики СЭЭС, поэтому при выборе вида тока и, соответственно, источника необходимо учитывать следующие факторы. Системы переменного тока включают компактные электрические машины, преобразователи электроэнергии и коммутационные устройства. Важным показателем является мощность СЭЭС, от которой зависят критерии эффективности системы в целом. Значение ее определяется потребителями. Для ответственных потребителей необходимо создать оптимальный резерв источников и преобразователей [3–5].

## Алгоритм расчета силовой части компенсатора реактивной мощности (КРМ)

Algorithm for calculation of reactive power compensator

При расчете силовой части КРМ необходимо определить его параметры исходя из требований по компенсации реактивной мощности.

В процессе расчета силовой части КРМ определяются следующие показатели:

- номинальное фазное напряжение компенсатора реактивной мощности;
- номинальная мощность компенсатора реактивной мощности;
- номинальная генерируемая реактивная мощность;
- номинальная потребляемая реактивная мощность;
- диапазон регулирования реактивная мощность;
- конденсаторная батарея;
- фазные реакторы;
- силовые электронные ключи (ГТО-тиристоры с обратными диодами).

Эффективность работы системы управления КРМ определяется на основе следующих критериев:

- точность управления током в статических и динамических режимах;

- независимость регулирования выходного тока от отклонений внешних параметров от номинальных значений (например, напряжения сети);
- устойчивость к помехам в каналах передачи и обработки данных;
- стабильность частоты коммутации;
- гармонический состав выходного тока на частотах модуляции, возможность предотвращения возникновения различных аварийных режимов.

Управление ключами полупроводникового преобразователя осуществляется с применением метода широтно-импульсной модуляции. При использовании этого метода на стороне переменного тока преобразователя напряжения можно формировать токи требуемых частоты, значения и формы.

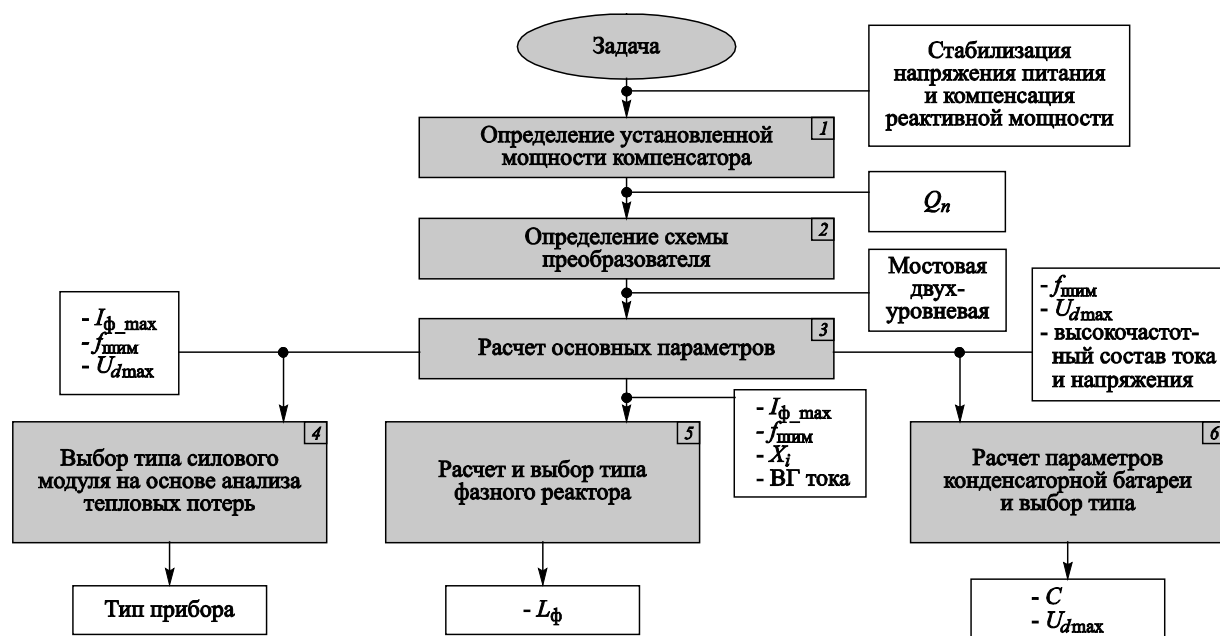
Система управления компенсатором подразделяется на две подсистемы: одной является компенсатор реактивной мощности, а другой – компенсатор мощности высших гармоник. Функционирование КРМ связано с необходимостью управления динамическими и статическими процессами в устройстве. Эффективность системы управления в значительной мере определяется ее алгоритмом и выбором адекватных аппаратных средств ее реализации [9–11].

Управление корректором реактивной мощности осуществляется микропроцессорной системой, способной реализовать требуемые алгоритмы работы устройства. Задача системы управления КРМ заключается в регулировании реактивной мощности, генерируемой или потребляемой устройством. Управление реактивной мощностью осуществляется посредством формирования заданного гармонического состава напряжения преобразователя [9].

На рис. 2 показана блок-схема алгоритма расчета элементов силовой части КРМ.

Реактивная мощность КРМ может иметь емкостной или индуктивный характер в зависимости от напряжения сети. Регулирование активной мощности в преобразователе осуществляется для компенсации мощности потерь в преобразователе, которая снижает напряжение на конденсаторе, включаемом на стороне постоянного тока преобразователя КРМ [10, 11].

Резкое изменение реактивной мощности КРМ приводит к скачкам напряжения на конденсаторной батарее (КБ) из-за взаимосвязи активной и реактивной составляющих тока КРМ, т.к. реактивная мощность на порядок больше, чем мощность высших гармоник. Для демпфирования этого явления применяется индуктивность в качестве гальванической



**Рис. 2.** Блок-схема алгоритма расчета параметров силовой части компенсатора реактивной мощности  
**Fig. 2.** Block diagram of calculating the parameters of reactive power compensator

развязки, которая позволяет снизить скачки напряжения на КБ.

При вычислении значений активной и реактивной составляющих тока задания компенсатора используется метод «мгновенной мощности», известный как  $p$ - $q$  теория [11]. В этом методе используется значение мгновенной мощности трехфазной системы, а не усредненные значения.

Суть метода заключается в преобразовании составляющих тока и напряжения в трехфазной системе посредством выделения различных составляющих ее мощности в двухфазную систему неподвижных координат  $\alpha$  и  $\beta$  посредством преобразования. Проекция обобщенного вектора тока или напряжения на оси двухфазной системы координат обозначаются как  $\alpha$  и  $\beta$ . Преобразование Кларк справедливо как для симметричной, так и для несимметричной трехфазной системы токов и напряжений. Оно выражается:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \\ i_o(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Если в системе отсутствует нулевой провод, то токи и напряжения непосредственно определяются по формулам:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $i_\alpha(t)$ ,  $i_\beta(t)$  и  $i_o(t)$  – проекции пространственного вектора тока на оси двухфазной стационарной системы координат;  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$  – проекции пространственного вектора тока на оси трехфазной системы координат.

Таким образом, пространственный вектор тока раскладывается на две ортогональные составляющие:

$$\bar{i}(t) = i_{\alpha}(t) + j i_{\beta}(t). \quad (4)$$

Коэффициент перед матрицей в выражении (2) выбирается произвольно, т.к. он отвечает за соотношение амплитуд проекций напряжений трехфазной и двухфазной систем. Если использовать коэффициент  $k = \sqrt{2/3}$ , то в формулах прямого и обратного преобразования будет использоваться одинаковый коэффициент, а найденные значения мгновенных мощностей будут иметь правильный масштаб. Значение  $k_{пр}$  может изменяться в зависимости от принятых базовых значений преобразуемых координат и модуля обобщенного вектора.

Если использовать коэффициент  $k = 2/3$ , то в формуле обратного преобразования коэффициент будет равен единице, а амплитуда проекций  $i_{\alpha}(t)$  и  $i_{\beta}(t)$  равна амплитуде проекции  $i_{\alpha}(t)$ .

Если исходная трехфазная система напряжений симметрична, то согласно (3) результирующий вектор вращается с частотой сети в двухфазной системе координат  $\alpha - \beta$ , и при этом его модуль равен амплитуде фазного напряжения.

Посредством обратного преобразования Кларк находятся проекции вектора напряжения на оси трехфазной системы координат:

$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) \\ u_{\beta}(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В соответствии с  $p$ - $q$  теорией мгновенной мощности [11]

$$p = u_o i_o + u_a i_a + u_b i_b; \quad (6)$$

$$q = u_a i_a - u_b i_b. \quad (7)$$

Выражение (6) можно представить в  $\alpha - \beta$  координатах.

Согласно  $p$ - $q$  теории вводятся понятия действительной  $p(t)$  и мнимой  $q(t)$  мгновенных мощностей в  $\alpha - \beta$  координатах, в системе без нулевого провода, тогда:

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) & u_{\beta}(t) \\ -u_{\alpha}(t) & u_{\beta}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Действительная составляющая (4) мгновенной мощности  $p(t)$  соответствует активной мощности в традиционном представлении. В то же время мнимая мгновенная мощность  $q(t)$  не соответствует традиционной реактивной мощности.

Выражая токи  $i_{\alpha}$  и  $i_{\beta}$  в  $\alpha - \beta$  координатах как функцию составляющих мгновенной мощности (4), получаем [11]:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix}; \quad (9)$$

где  $i_{\alpha p}$ ,  $i_{\alpha q}$  и  $i_{\beta p}$ ,  $i_{\beta q}$  – составляющие тока, определяющие действительную часть, мнимую часть мгновенной мощности, определяются по выражениям:

$$i_{\alpha p} = \frac{u_{\alpha} p}{(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)}, \quad i_{\alpha q} = \frac{u_{\beta} q}{(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)}, \quad (10)$$

$$i_{\beta p} = \frac{u_{\beta} p}{(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)}, \quad i_{\beta q} = \frac{u_{\alpha} q}{(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)}. \quad (11)$$

Согласно  $p$ - $q$  теории действительная и мнимая мощность могут быть представлены как сумма постоянной и переменной составляющей:

$$p = \bar{p} + \tilde{p};$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}. \quad (12)$$

Для генерации реактивной мощности с целью компенсации реактивной мощности нагрузки необходимо регулировать  $\bar{q}$  составляющую мгновенной мощности. Для генерации активной мощности компенсатора необходимо регулировать  $\bar{p}$  составляющую мгновенной мощности компенсатора. Регулятор реактивной и активной мощности компенсатора использует найденные значения активной и реактивной мощности для вычисления мощности задания компенсатора реактивной мощности ( $p^*$ ,  $q^*$ ).

Токи компенсатора определяются по найденным значениям мощности КРМ и напряжению сети в точке его подключения:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $i_{\alpha}^*$ ,  $i_{\beta}^*$  – токи задания компенсатора в двухфазной системе координат,  $p^*$ ,  $q^*$  – активная и ре-

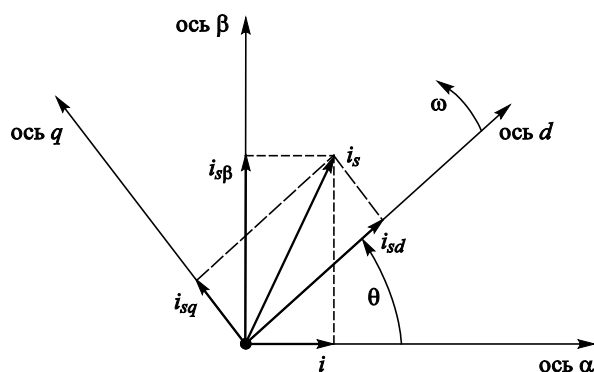
активная мощность компенсатора реактивной мощности [11].

Преимуществом использования теории «мгновенной мощности» является отсутствие необходимости осуществления синхронизации токов компенсатора с напряжением сети. Это обеспечивает стабильное качество управления мощностью КРМ в динамических режимах работы устройства, что особенно важно при сети ограниченной мощности, когда изменение мощности компенсатора приводит к быстрому изменению фазы напряжения сети в точке подключения. Поскольку составляющие мгновенных мощностей  $p$  и  $q$ , соответствующие активной и реактивной мощности, являются величинами постоянными (или медленно меняющимися в динамических режимах работы), то значительно упрощается их генерация и регистрация.

Постоянные величины  $\bar{p}$  и  $\bar{q}$  выделяются посредством информационных фильтров низких частот (ФНЧ) с минимальной фазовой задержкой и ослаблением выделяемой составляющей входного сигнала. Наиболее эффективно фильтр низких частот может быть реализован при использовании метода среднего значения, когда некоторое количество отсчетов входного сигнала суммируется и делится на количество этих отсчетов (или умножается на коэффициент, равный отношению единицы к сумме этих отсчетов).

Недостатком [11] теории «мгновенной мощности» является непосредственное использование переменных  $u_a$ ,  $u_\beta$  и  $u_o$  в операции вычисления токов задания (13). Это приводит к низкой помехоустойчивости этой системы управления, т.к. при прохождении случайного импульса по каналу получения информации относительно напряжения сети (например, внешний паразитный сигнал наводки на датчик напряжения сети) будет неправильно рассчитан ток задания компенсатора. Это может привести к колебательному переходному процессу выходного тока и напряжения компенсатора, т.к. преобразователь является нелинейной системой.

Если вместо напряжения сети в ортогональной системе координат  $u_a$ ,  $u_\beta$  в формулах (9) и (13) использовать единичные сигналы, синхронизированные по фазе и частоте с этими составляющими напряжения, то  $p$  и  $q$  составляющие мощности будут иметь размерность тока. При этом в операции вычисления токов задания переменные  $u_a$ ,  $u_\beta$  не используются. Применяются единичные синхронизированные сигналы, вследствие чего метод становится устойчивым к помехам в канале измерения напряжения сети.



**Рис. 3.** Разложение пространственного вектора тока на ортогональные составляющие во вращающейся системе координат

**Fig. 3.** Resolving of spatial current vector into orthogonal components in rotating coordinate system

Этот метод основан на прямом и обратном преобразовании Парка – Горева. Прямое преобразование заключается в нахождении проекции обобщенного вектора тока или напряжения на оси ортогональной системы координат, вращающейся синхронно с вектором напряжения сети.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где  $\theta = \omega \cdot t$  – значение угла поворота вращающейся системы координат с частотой  $\omega$ .

В преобразовании участвуют проекции пространственного вектора на неподвижную систему координат  $\alpha - \beta$ . Оси вращающейся системы координат и проекции обобщенного вектора напряжения на эти оси обозначаются как  $d$  и  $q$ .

Графически разложение вектора тока показано на рис. 3. Таким образом, обобщенный вектор раскладывается на две ортогональные составляющие, вращающиеся синхронно с вектором напряжения сети:

$$\bar{i} = i_d + j i_q = I_m \cdot e^{-j\omega t}, \quad (15)$$

где  $I_m$  – амплитуда обобщенного вектора тока,  $\omega$  – частота его вращения.

Переменные составляющие проекций  $i_d$  и  $i_q$  ( $\tilde{i}_d$ ,  $\tilde{i}_q$ ) соответствуют высшим гармоническим составляющим и обратной последовательности токов. Для выделения постоянных составляющих, несущих информацию об активной и реактивной мощности, применяются ФНЧ.

Обратное преобразование Парка – Горева осуществляется по формуле:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Таким образом, если к трехфазной системе тока сначала применить прямое преобразование Кларк, а затем прямое преобразование Парка – Горева, то постоянные составляющие проекций на оси  $d-q$  будут соответствовать составляющим тока с синхронной частотой  $\omega$ . Положение обобщенного вектора тока относительно осей координат  $d-q$  (угол вектора) определяется разностью фаз между синхронными ( $\cos \theta$  и  $\sin \theta$ ) и преобразуемыми сигналами ( $i_\alpha$  и  $i_\beta$ ) [11]. Если сигналы  $\cos \theta$  и  $\sin \theta$  синхронны с сигналами  $u_\alpha$  и  $u_\beta$ , то сигналы  $i_d$  и  $i_q$  имеют смысл амплитуд активной и реактивной составляющих измеряемой тройки тока ( $i_a, i_b, i_c$ ).

Преимуществом предлагаемого метода по сравнению с теорией «мгновенной мощности» является возможность оперирования непосредственно активными и реактивными составляющими тока и напряжения. Выбор фазы синхронизирующего сигнала позволяет свободно располагать вектор обрабатываемого сигнала относительно осей  $d-q$ .

Так, располагая вектор сигнала только на одной из осей  $d$  или  $q$ , проекция его на другую ось ( $q$  или  $d$ ) будет равна нулю, поэтому значительно сокращается объем вычислений. Преимуществом метода является также использование эталонных сигналов при вычислении токов задания компенсатора, а также наличием ФНЧ, которые значительно ослабляют возможные импульсные помехи в канале измерения токов.

Как правило, требуется контролировать напряжение на накопителе. При работе накопитель осуществляет обмен активной мощностью в сеть или из сети. Для вычисления активной составляющей тока компенсатора, обеспечивающей поток активного тока, используется метод пропорционально-интегрального регулирования по отклонению напряжения на накопителе  $U_d$  от его номинального значения  $U_{d\_ном}$ . На выходе регулятора образуется значение активного тока первой гармоники в синхронных координатах  $i_d$ , которое поступает на блок регулирования активного и реактивного тока компенсатора.

## Выводы

### Conclusion

1. Обеспечение требуемого качества электрической энергии компенсатора реактивной мощно-

сти, а также обеспечение ЭМС требует применения многоуровневых преобразователей с использованием современных импульсно-модуляционных алгоритмов управления с прямым микропроцессорным управлением.

2. Расчет заданных токов в корректоре реактивной мощности выполнен на основе аналитических соотношений теории мгновенной мощности ( $p-q$  теории), основанной на представлении мгновенных значений  $\alpha-\beta$  или вращающихся с частотой  $d-q$  координат.

## Список использованной литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. Электрическое оборудование: НД № 2-020101-174 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2022. 421 с.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Стандартинформ, 2014. III, 16 с.
3. Рамадан А., Ясаков Г.С., Томилин С.А. Состояние, перспективы развития и проблема выбора регулируемого электропривода в корабельных электроэнергетических системах // Морской вестник. 2007. № 2. С. 45–47.
4. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). Санкт-Петербург: Электросила, 2003. 172 с.
5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Москва: Academia, 2006. 264 с.
6. Лазарев Г.Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике // Электротехника. 2005. № 11. С. 3–8.
7. Дмитриев Б.Ф., Лихоманов А.М., Агунов А.В. Синтез управления качеством стабилизации и регулирования параметров электроэнергии // Техническая электродинамика. Киев, 2000. Ч. 9. С. 14–15. (Материалы VI Международной научно-технической конференции «Проблемы современной электротехники – 2000»; вып. 9).
8. Вербова Н.В., Агунов А.В. Силовое активное фильтрокомпенсирующее устройство с системой управления по отклонению // Судостроение. 2020. № 1. С. 16–18.
9. Гармонический анализ и синтез полупроводниковых преобразователей с импульсно-модуляционным

- управлением / Б.Ф. Дмитриев, А.М. Лихоманов, А.Ю. Розов, С.А. Панин. Санкт-Петербург : Изд. Политехнического университета, 2014. 324 с.
10. Розанов Ю.К. Силовая электроника. Москва : Изд. МЭИ, 2018. 508 с.
  11. Akagi H. Trends in active power line conditioners // IEEE Transactions on power electronics. 1994. Vol. 9, № 3. P. 263–268. DOI: 10.1109/63.311258.
  12. Akagi H., Kanazawa Y., Nabaе A. Instantaneous reactive power compensation comprising switching devices without energy storage elements // IEEE Transactions on Industry Applications. 1984. Vol. IA-20, № 3. P. 625–630. DOI: 10.1109/TIA.1984.4504460.
  13. Цицикян Г.Н., Баранов Ю.Д. Компенсирующие токи и коэффициент мощности // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 4. С. 93–103.
  10. Rozanov Yu.K. Power electronics. Moscow : Publishing House of Moscow Power Engineering Institute (MPEI), 2018. 508 p. (in Russian).
  11. Akagi H. Trends in active power line conditioners // IEEE Transactions on power electronics. 1994. Vol. 9, № 3. P. 263–268. DOI: 10.1109/63.311258.
  12. Akagi H., Kanazawa Y., Nabaе A. Instantaneous reactive power compensation comprising switching devices without energy storage elements // IEEE Transactions on Industry Applications. 1984. Vol. IA-20, № 3. P. 625–630. DOI: 10.1109/TIA.1984.4504460.
  13. Tsitsikyan G.N., Baranov Yu.D. Compensating currents and power coefficient // Proceedings of Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2015. No. 4. P. 93–103 (in Russian).

## References

1. Rules of the classification and construction of sea vessels. Part XI. Electrical Equipment : ND No. 2-020101-174 / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022. 421 p. (in Russian).
2. GOST32144-2013 Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow : Standartinform, 2014. III, 16 p. (in Russian).
3. Ramadan A., Yasakov G.S., Tomilin S.A. Current status, prospects for development and problem of selection a controlled electric drive for ship electric power systems // Morskoy Vestnik. 2007. No. 2. P. 45–47 (in Russian).
4. Pronin M.V., Vorontsov A.G. Fully controlled power semiconductor converters (modeling and design). St. Petersburg : Electrosila, 2003. 172 p. (in Russian).
5. Sokolovsky G.G. AC frequency-controlled electric drive. Moscow : Academia, 2006. 264 p. (in Russian).
6. Lazarev G.B. Powerful high-voltage frequency converters for controlled electric drives in power engineering // Electric engineering. 2005. No. 11. P. 3–8 (in Russian).
7. Dmitriev B.F., Likhomanov A.M., Agunov A.V. Synthesis of stabilization quality control and regulation of electric power parameters // Technical electrodynamics. Kiev, 2000. Part 9. P. 14–15. (Transactions of VI International Conference “Problems of modern electric engineering 2000” ; Vol. 9) (in Russian).
8. Verbova N.V., Agunov A.V. Active harmonic filter with deviation control system // Sudostroenie. 2020. No. 1. P. 16–18 (in Russian).
9. Harmonic analysis and synthesis of semiconductor converters with pulse-modulation control / B.F. Dmitriev, A.M. Likhomanov, A.Yu. Rozov, S.A. Panin. St. Petersburg : Publishing House of St. Petersburg State Polytechnical University, 2014. 324 p. (in Russian).

## Сведения об авторах

Дмитриев Борис Федорович, д.т.н., профессор, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д.3. E-mail: dmitrievbf@yandex.ru.

Галушин Сергей Яковлевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры судовой автоматики и измерений ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д.3. E-mail: gs@smtu.ru.

Согонов Сергей Александрович, к.т.н., доцент, доцент кафедры судовой автоматики и измерений ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д.3. E-mail: ssogonov@mail.ru.

Розов Алексей Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры судовой автоматики и измерений, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д.3. E-mail: rozov33@gmail.com.

Максимова Марина Александровна, к.т.н., доцент кафедры судовой автоматики и измерений ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д.3. E-mail: maximovama@yandex.ru.

## About the authors

Boris F. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: dmitrievbf@yandex.ru.



*Sergey Y. Galushin*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Ship Automation and Measurements, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: gs@smtu.ru.

*Sergey A. Sogonov*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Ship Automation and Measurements, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: ssogonov@mail.ru.

*Alexei J. Rozov*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Ship Automation and Measurements, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: rozov33@gmail.com.

*Marina A. Maksimova*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Ship Automation and Measurements, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: maximovama@yandex.ru.

Поступила / Received: 10.02.23  
Принята в печать / Accepted: 01.06.23  
© Коллектив авторов, 2023