

УДК 621.314

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКТИВНЫХ СИЛОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

Дыбко Максим Александрович,
Raptor9000@yandex.ru

Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, к. 4.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности систем электроснабжения для северных регионов, где расположена большая часть добывающей промышленности страны. Электроснабжение в этих районах обеспечивается, как правило, дизельными, газопоршневыми и гидроэлектрическими установками. Из-за отсутствия централизованного электроснабжения, дороговизны доставки топлива стоимость электроэнергии на порядок выше, чем в средней полосе России. Обилие нелинейных нагрузок и потребителей реактивной мощности приводит не только к ухудшению качества электрической энергии, но и к потерям из-за реактивной мощности и мощности искажения. Для минимизации негативного влияния нелинейных и реактивных потребителей в систему электроснабжения включают активный силовой фильтр, который представляет собой инвертор напряжения в режиме управляемого источника тока. Установка активного силового фильтра в систему электроснабжения требует серьезных капитальных вложений, поэтому необходима предварительная оценка экономического эффекта от его эксплуатации. Это, в свою очередь, требует проведения комплексной оценки его энергетической эффективности. Отсутствие на сегодняшний день единого методологического подхода к оценке эффективности работы активных силовых фильтров, отсутствие методики оценки КПД подобных устройств, а также необходимость оценки экономического эффекта от компенсации высших гармоник и реактивной мощности актуализирует задачу разработки математического аппарата оценки энергетической эффективности работы активных силовых фильтров.

Цель: повышение эффективности использования электрической энергии в системах электроснабжения северных регионов за счет применения систем накопления и активных силовых фильтров.

Объекты: устройства, предназначенные для обмена электромагнитной энергией с сетью – активные силовые фильтры и компенсаторы; нагрузки – нелинейные и реактивные.

Методы. Для достижения поставленной цели требуется разработка математического аппарата для адекватной оценки энергетической эффективности работы активных силовых фильтров. Для решения этой задачи выполнено математическое моделирование с использованием спектрального метода анализа и переключающих функций; составлена дискретная математическая модель трехфазного тиристорного управляемого мостового выпрямителя; составлена дискретная математическая модель активных силовых фильтров, включающая в себя расчет всех участков силовой схемы преобразователя, а также математическое описание алгоритма управления силовыми ключами; математическое описание активных силовых фильтров содержит расчет токовой загрузки силовых полупроводниковых приборов, расчет статических и динамических потерь. Предложен подход к расчету КПД активных силовых фильтров, где за полезную мощность принимается активная мощность, отдаваемая в нагрузку, а за полную мощность – сумма активной полезной мощности и потерь в активных силовых фильтрах. Предложен ряд других критериев для оценки энергетической эффективности активных силовых фильтров по реактивной мощности, полной мощности и мощности искажения.

Результаты. Получены результаты расчета электромагнитных процессов в силовой цепи активных силовых фильтров, интегральных параметров токовой загрузки силовых ключей инвертора активных силовых фильтров, статических и динамических потерь в активных силовых фильтрах, показателей энергетической эффективности активных силовых фильтров при работе на нелинейную и реактивную нагрузку. Расчеты получены для двух топологий инверторов активных силовых фильтров – двухуровневого и трехуровневого. Результаты расчетов в математической модели проверены имитационным моделированием в Matlab Simulink.

Ключевые слова:

Электроснабжение северных регионов, компенсация реактивной мощности, компенсация мощности искажения, математическое моделирование работы активного силового фильтра, расчет коэффициента полезного действия активного силового фильтра.

Введение

Северные территории и приравненные к ним в Российской Федерации занимают более 50 % от общей площади страны, 20 % территории находится за полярным кругом с населением около 2,5 млн человек [1]. Это отдельные районы Республик Саха (Якутия) и Карелии, Мурманской, Архангельской, Магаданской, Амурской и Сахалинской областей, Камчатского края, Чукотского АО, Ханты-Мансийского АО, Ямало-Ненецкого АО. Северные территории играют ключевую роль в национальной экономике, в обеспечении безопасности и геополитических интересов

России. Здесь сосредоточены основные запасы углеводородного, фосфорного и алюминий содержащего сырья, алмазов, редких, цветных и благородных металлов, добывается 93 % природного газа, 75 % нефти, включая газовый конденсат, 100 % алмазов, кобальта, платиноидов, апатитового концентрата, 90 % меди, никеля, 2/3 золота, производится половина лесной и рыбной продукции [2]. Системы энергоснабжения данных территорий имеют низкую энергетическую эффективность, средний износ генерирующего оборудования превышает 60 %, редко обновляются, что в конечном итоге приводит к низкой надежности. Не-

редки случаи блэкаута длительностью в 12–15 часов. Другой важной проблемой данных территорий является высокая стоимость электроснабжения. В отдельных районах стоимость 1 кВт·ч электрической энергии составляет 70 р. Большая часть расходов ложится на потребителя, а часть расходов компенсируется из федерального бюджета. [3]. На покрытие энергообеспечивающим предприятиям данных территорий ежегодно выделяется 60–65 млрд р. субсидий из бюджета [3]. К основным видам привозного топлива в такие районы относятся мазут, дизельное топливо и уголь. Существуют соответствующие логистические трудности и повышенные издержки на поставки данных видов топлива «Северным заводом». Для этих регионов тонна дизельного топлива обходится в 70–90 тыс. р./т, в то время как его стоимость для центральных регионов составляет порядка 50–55 тыс. р./т [4, 5].

Электроснабжение удаленных районов и населенных пунктов с низким количеством жителей за счет постройки линий электропередач, как правило, экономически нецелесообразно. Производство электрической энергии в таких районах осуществляется дизельными генераторными (ДГУ), газопоршневыми (ГПУ) и гидроэнергетическими установками (ГЭУ). Эффективность работы ДГУ и ГПУ определяется как отношение реализованной электрической энергии (проданной потребителю) к условной единице затраченного на ее выработку топлива, зависит от динамики изменения нагрузки, суточных графиков электрических нагрузок (динамика суточного потребления) и режимов работы самих установок. График суточного энергопотребления в отдаленных регионах крайне неравномерный, что негативно сказывается на эффективности расхода топлива. В дополнение к этому большая часть электрических нагрузок является источниками кондуктивных помех (высших гармоник тока) и потребителями реактивной мощности. В сетях малой генерации, а сети северных регионов на базе ДГУ, ГПУ и ГЭУ являются таковыми, высшие гармоники тока и потребление реактивной мощности оказывают негативное влияние на качество электрической энергии [6–11]. Наличие высших гармоник приводит к росту потерь в линиях электропередач, дополнительному нагреву электрооборудования, ускоренному старению изоляции и другим негативным эффектам [6, 8]. Потребление некомпенсированной реактивной мощности является причиной увеличения действующего значения тока сети, что в конечном счете ведет к росту полной потребляемой мощности без увеличения полезной, а также квадратичному росту мощности потерь [11]. Следствием вышперечисленного является неэффективное использование электрической энергии, а в случае питания от ДГУ или ГПУ еще и повышенному расходу топлива. Проблема обилия нелинейных и реактивных нагрузок становится актуальной не только в сетях малой генерации северных регионов страны, но и в сетях промышленных предприятий в других регионах. В этой связи задача повышения эффективности использования электрической энергии и ее качества ставится на государственном уровне, что нашло отражение в ряде документов,

утвержденных Правительством Российской Федерации: «Перечень критических технологий Российской Федерации от 7 июля 2011 года» [12], «Энергетическая стратегия России до 2035 г.» [13] и «Государственная программа РФ "Энергоэффективность и развитие энергетики"» [14].

В настоящее время повышение эффективности использования электрической энергии и ее качества в централизованных и малых сетях добиваются использованием, в частности, активных силовых фильтров (АСФ) и систем накопления энергии (СНЭ). АСФ позволяют компенсировать высшие гармоники нелинейной нагрузки, а также реактивную мощность. СНЭ позволяют накапливать электрическую энергию в часы низкого потребления и отдавать в часы пикового потребления, что обеспечивает более равномерное суточное энергопотребление. Для комплексной оценки энергетической эффективности при работе обоих устройств требуется расчет и анализ электромагнитных процессов в системе «источник электроэнергии – нагрузка – АСФ (СНЭ)». Анализ электромагнитных процессов необходим для комплексной оценки эффективности работы всего электротехнического комплекса. Целесообразность такой оценки проистекает из необходимости существенных вложений в приобретение, установку и обслуживание АСФ или СНЭ. Перед принятием решения о целесообразности установки подобного оборудования следует оценить, как скоро вложенные затраты окупят себя в виде снижения энергопотерь в системе и повышения эффективности и надежности работы электрооборудования. В настоящее время нет единого методологического подхода к оценке эффективности работы, например, АСФ или статических компенсаторов. Для этих и им подобных устройств отсутствует такое понятие, как коэффициент полезного действия, поскольку отсутствует в принципе понятие полезной мощности. Устройства компенсации в силу принципов своей работы осуществляют двухсторонний обмен электромагнитной энергией с источником первичного электропитания. В связи с этим задача качественного и количественного анализа электромагнитных процессов и энергетических характеристик является актуальной.

На сегодняшний день эффективность работы АСФ оценивают, в частности, с помощью коэффициентов гармоник тока и напряжения в сети до и после компенсации влияния нелинейной нагрузки [15]. В работе [16] предлагается свой критерий энергетической эффективности АСФ, отражающий относительную величину потерь в инверторе АСФ по отношению к компенсированным потерям мощности в сети. Такой критерий прямо показывает, насколько целесообразно в каждом конкретном случае использовать АСФ. Однако введенный критерий не учитывает потери мощности в фильтре ШИМ-гармоник АСФ, которые могут составлять до 60 % от всех потерь мощности в АСФ. Авторы [17] оценивают эффективность гибридных АСФ по нескольким показателям: полная мощность инвертора АСФ, коэффициент мощности нагрузки до и после компенсации, коэффициент гар-

мониторинг тока до и после компенсации для разных типов нагрузки. Сравнение по разным показателям делает оценку более объективной, однако большая часть сравниваемых показателей – абсолютные значения: мощности инвертора, напряжения звена постоянного тока, токи сети и инвертора, что затрудняет интерпретацию результатов для других диапазонов мощностей, топологий АСФ и т. п. В [18] авторы приводят сравнительный анализ мощности потерь для различных систем кондиционирования электрической энергии, которые состоят из двух типов АСФ – параллельного и последовательного. Анализ основан на расчете и сравнении мощностей потерь в абсолютных значениях. Из анализа литературы можно заключить, что для объективной оценки эффективности АСФ целесообразно введение относительных показателей и коэффициентов, имея которые можно сравнивать эффективность работы АСФ, статических компенсаторов и иных подобных устройств в различных случаях.

Для определения показателей энергетической эффективности АСФ необходимо выполнить анализ электромагнитных процессов на математической модели, который включает в себя расчет мгновенных значений токов и напряжений в силовой цепи АСФ, интегральных параметров токовой загрузки силовых полупроводниковых приборов, показателей качества электрической энергии, статических и динамических потерь мощности, потерь в фильтрах ШИМ-гармоник. Для этого в работе составлена математическая модель системы «первичный источник – нагрузка – АСФ». Модель основана на дискретном вычислении всех электрических переменных на одном периоде основной гармоники в установившемся режиме. Математический аппарат модели составляют переключающие (коммутационные) функции и спектральный метод [19–21].

Для вычисления КПД АСФ предложен принципиально новый подход, в соответствии с которым полезной мощностью будем считать активную мощность по основной гармонике, которая поступает в нагрузку (потери в самой нагрузке при этом не учитываются, т. к. нас интересует только потребляемая

от сети активная мощность); полная активная мощность при этом складывается из полезной мощности и потерь в АСФ, включающих в себя статические и динамические потери в силовых полупроводниковых приборах АСФ и потери активной мощности в фильтре ШИМ-гармоник АСФ. Стоит отметить, что в литературе в настоящее время имеется широкий спектр публикаций, посвященных различным способам определения статических и динамических потерь в силовых транзисторах инверторов напряжения [22–30]. Наибольшую сложность в инверторах напряжения представляет расчет динамических потерь. Многие методики ставят в основу синусоидальный характер протекающих в инверторе процессов, что позволяет получить более простое аналитическое выражение для расчета потерь [22, 23, 25, 27–29]. Однако особенность анализа электромагнитных процессов в инверторе АСФ в том, что все процессы носят несинусоидальный характер в режиме компенсации высших гармоник, т. к. инвертор работает в режиме источника несинусоидального тока. В связи с этим за основу для расчета динамических потерь была взята методика прямого вычисления энергии коммутации на каждом такте, описанная в заметке компании Semikron [30], и успешно опробована в ряде работ [24, 25, 28, 29].

В работе получены результаты анализа электромагнитных процессов в системе «первичный источник – нелинейная нагрузка – АСФ», интегральные параметры токовой загрузки силовых транзисторов инвертора АСФ для двух топологий инверторов, выполнены расчеты статических и динамических потерь в инверторе АСФ и фильтре ШИМ-гармоник. Результаты расчета на математической модели сопоставлены с результатами имитационного моделирования в Matlab Simulink.

Описание математической модели

Схема модели системы «Первичный источник – нелинейная нагрузка – АСФ» приведена на рис. 1, а. Эквивалентная расчетная схема приведена на рис. 1, б.

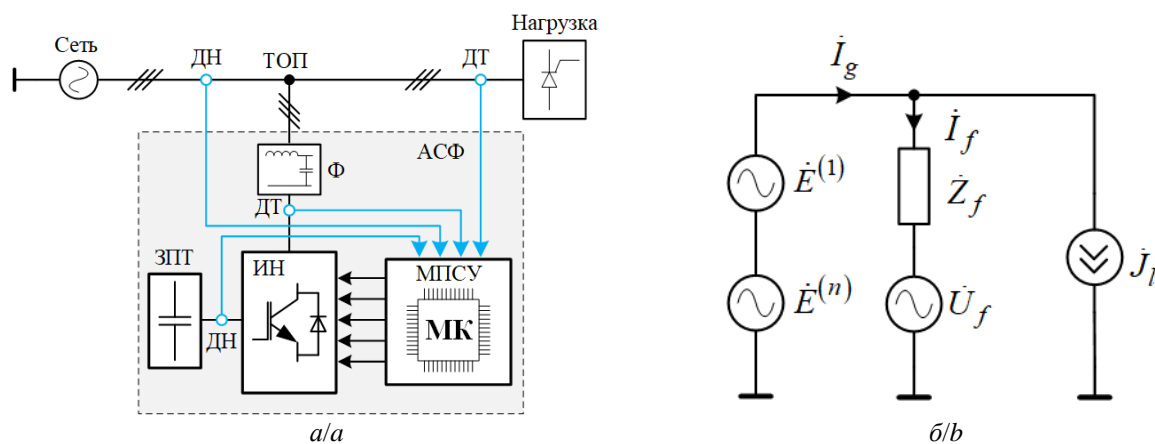


Рис. 1. Математическая модель системы «трехфазная сеть – нелинейная нагрузка – АСФ»: а) блок-схема модели; б) эквивалентная схема

Fig. 1. Mathematical model of the system «Three-phase AC grid – nonlinear load – Active power filter (APF)»: a) block diagram; b) equivalent circuit

Анализ электромагнитных процессов будем проводить с допущением, что трехфазная сеть является симметричной и ее мощность много больше мощности нагрузки.

Из эквивалентной схемы можно записать выражение для внутренней ЭДС АСФ:

$$\dot{U}_f = \dot{E} - (\dot{I}_g - \dot{J}_l) \dot{Z}_f, \quad (1)$$

где $\dot{E} = \dot{E}^{(1)} + \dot{E}^{(n)}$ – ЭДС сети, которая в общем случае может представлять собой сумму основной $\dot{E}^{(1)}$ и высших $\dot{E}^{(n)}$ гармоник; \dot{I}_g – ток сети; \dot{J}_l – ток нагрузки; \dot{Z}_f – импеданс фильтра ШИМ-гармоник.

Описанная здесь математическая модель является дискретной, и все мгновенные значения электрических переменных за период основной гармоники получены в виде одномерных массивов размерностью $N=2^{14}=16384$, что соответствует шагу дискретного

моделирования $\Delta = \frac{T^{(l)}}{N} = \frac{0,02}{16384} = 1,2 \text{ мкс}$. Число

гармоник в спектрах электрических переменных равно $N_n=0,5N=8192$, что обеспечивает достаточную точность при воспроизведении периодических сигналов спектром гармоник.

Пусть ток нагрузки \dot{J}_l известен (задан рядом гармоник) и представляет собой ток управляемого мостового выпрямителя (рис. 2).

Напряжение трехфазной симметричной системы может включать в себя высшие гармоники и определяется следующим образом в комплексной форме:

$$\dot{E}_{abc} = E_1 e^{j\varphi_{e,1}} + \sum_{n>1} E_n e^{j\varphi_{e,n}}.$$

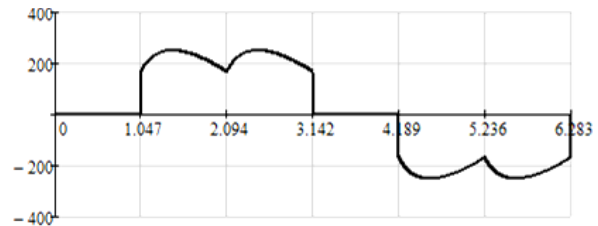


Рис. 2. Ток нелинейной нагрузки
 Fig. 2. Nonlinear load input current

Алгоритм расчета электрических переменных в модели схематично представлен на, рис. 3. Переход от временной области к частотной осуществляется посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ):

$$\dot{\mathbf{F}} = \text{FFT}(f(t)), \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{F}} = (\dot{F}^{(1)} \dot{F}^{(2)} \dots \dot{F}^{(n)})^T$ – вектор-столбец комплексных значений гармоник $f(t)$. Оператор **FFT** реализует быстрый алгоритм дискретного преобразования Фурье. Результат выполнения этого оператора – массив гармонических составляющих в комплексной форме. Переход от частотной области осуществляется с помощью обратного преобразования:

$$f(t) = \text{IFFT}(\dot{\mathbf{F}}). \quad (3)$$

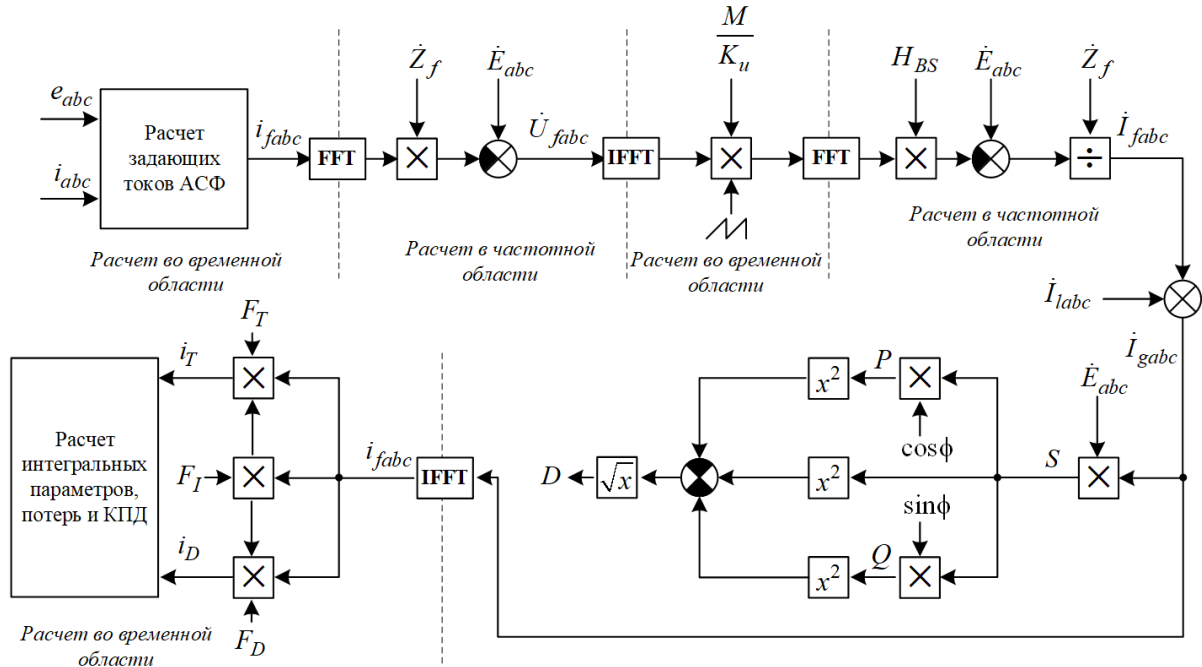


Рис. 3. Алгоритм расчета электромагнитных процессов в математической модели

Fig. 3. Electromagnetic processes calculation algorithm implemented in the mathematical model

Вычислим ток АСФ. В качестве математического аппарата используем теорию мгновенной мощности Х. Акаги [31]. Алгоритм формирования компенсирующего воздействия в виде тока, согласно этой теории, будет следующим:

1. Преобразование координат из $\{a,b,c\}$ в $\{\alpha,\beta\}$ (преобразование Кларк) для напряжения сети и тока нагрузки. В случае потребления постоянной активной мощности от сети участвуют все гармоники сетевого напряжения $\{e_a, e_b, e_c\}$, а в случае

формирования синусоидального тока при искаженной сети участвуют только гармоники, образующие прямую последовательность трехфазного сетевого напряжения:

$$\begin{pmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}.$$

2. Вычисляется мгновенные действительные и мнимые мощности:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}.$$

3. Из действительной мощности вычитается постоянная составляющая (поскольку модель дискретная, то интеграл заменен дискретной суммой):

$$\tilde{p} = p - \frac{1}{N} \sum_i p_i.$$

4. Вычисляются компенсирующие токи в координатах $\{\alpha, \beta\}$

$$\begin{pmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{pmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{pmatrix}.$$

5. Выполняется обратное преобразование координат из $\{\alpha, \beta\}$ в $\{a, b, c\}$:

$$\begin{pmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{pmatrix}.$$

В случае необходимости формирования единичного коэффициента мощности при искаженной сети, т. е. чтобы ток сети повторял форму напряжения сети, используется алгоритм минимизации токов Фризе в координатах $\{a, b, c\}$ [32]:

1. Вычисляется мгновенное значение эквивалентной проводимости Фризе

$$g_e = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2}.$$

2. Из выражения (8) выделяется постоянная составляющая:

$$G_e = \frac{1}{N} \sum_i g_{e,i}.$$

3. Компенсирующие воздействия вычисляются из простого соотношения:

$$\begin{pmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{pmatrix} = G_e \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}.$$

Рассчитанные таким образом токи являются задающими в системе управления инвертором АСФ.

После этого в частотной области спектральным методом с помощью выражения (2) вычисляется гладкая составляющая выходного напряжения инвертора АСФ:

$$\dot{U}_{fabc}^{(n)} = \dot{E}_{abc}^{(n)} - \dot{I}_{fabc}^{(n)} \dot{Z}_f^{(n)}, \quad (4)$$

где $\dot{Z}_f^{(n)}$ – комплексный импеданс фильтра ШИМ-гармоник в звене переменного тока АСФ. Выражение (4) определяет гармонический состав гладкой составляющей выходного напряжения инвертора АСФ. После перехода во временную область (выражение (3)) можно получить эту составляющую и преобразовать ее к уровню модулирующего сигнала ШИМ:

$$u_{ref,abc} = u_{fabc} \cdot \frac{M}{K_u},$$

где $M = 2|\dot{U}_{f,a,b,c}^{(1)}|/U_{dc}$ – глубина модуляции; U_{dc} – напряжение звена постоянного тока; $K_u = |\dot{U}_{f,a,b,c}^{(1)}|$ – коэффициент пропорциональности по напряжению, имитирующий цепи деления напряжения в системе управления инвертором АСФ.

Опорный сигнал ШИМ задается в зависимости от типа инвертора. Для классического двухуровневого трехфазного инвертора опорный сигнал может быть треугольной формы:

$$u_{car} = u_{2L} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(A \cdot \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right],$$

для трехуровневого инвертора два опорных сигнала могут быть заданы как:

$$u_{car} = u_{3L\pm} = \frac{1}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(A \cdot \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \pm \frac{1}{2},$$

где $A = \frac{f_{PWM}}{f^{(1)}}$ – кратность частоты ШИМ (f_{PWM}) к

частоте основной гармоники. Тогда потенциалы фаз инвертора относительно виртуальной нейтрали будут равны: $\varphi_{a,b,c} = U_{dc} \cdot F_{sw}$ – для двухуровневого инвертора, и $\varphi_{abc} = \frac{U_{dc}}{2} \cdot (F_{sw1} F_{sw2} + F_{sw2})$ – для трехуровневого инвертора, где

$$F_{sw} = \frac{1}{2} \left[\text{sign}(u_{ref,a,b,c} - u_{2L}) + 1 \right] \quad (5)$$

переключающая функция силового модуля (включает в себя транзистор и диод) $S_1 = \{T_1, D_1\}$ верхнего плеча двухуровневого инвертора напряжения (рис. 4, а);

$$F_{sw1} = \frac{1}{2} \left[\text{sign}(u_{ref,abc} - u_{3L+}) + 1 \right];$$

$$F_{sw2} = \frac{1}{2} \left[\text{sign}(u_{ref,abc} - u_{3L-}) + 1 \right] \quad (6)$$

переключающие функции силовых ключей верхнего плеча S_1 и S_2 (рис. 4, б).

Таблица 1. Расчет мощностей спектральным методом
Table 1. Powers calculation using the spectral method

В нагрузке/Load side values:	В сети/Grid side values:
Полная мощность/Apparent power $S_l = \frac{3}{2} \sum_n \dot{E}^{(n)} i^{(n)} $	Полная мощность/Apparent power $S_g = \frac{3}{2} \sum_n \dot{E}^{(n)} i_g^{(n)} $
Активная мощность/Active power $P_l = \frac{3}{2} \sum_n \dot{E}^{(n)} i^{(n)} \cos [\arg(i^{(n)}) - \arg(\dot{E}^{(n)})]$	Активная мощность/Active power $P_g = \frac{3}{2} \sum_n \dot{E}^{(n)} i_g^{(n)} \cos [\arg(i_g^{(n)}) - \arg(\dot{E}^{(n)})]$
Реактивная мощность/Reactive power $Q_l = \frac{3}{2} \sum_n \dot{E}^{(n)} i^{(n)} \sin [\arg(i^{(n)}) - \arg(\dot{E}^{(n)})]$	Реактивная мощность/Reactive power $Q_g = \frac{3}{2} \sum_n \dot{E}^{(n)} i_g^{(n)} \sin [\arg(i_g^{(n)}) - \arg(\dot{E}^{(n)})]$
Мощность искажения/Distortion power $D_l = \sqrt{S_l^2 - P_l^2 - Q_l^2}$	Мощность искажения/Distortion power $D_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2 - Q_g^2}$

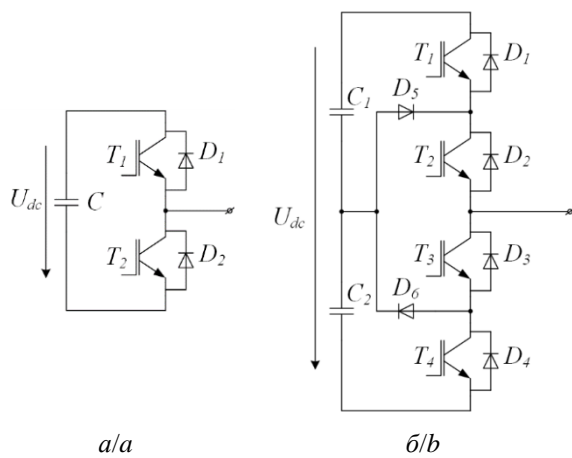


Рис. 4. Схемы двух- и трехуровневых инверторов (одна фазная стойка): а) двухуровневый инвертор; б) трехуровневый инвертор

Fig. 4. Two- and three-level inverter phase leg: a) two-level inverter; b) three-level inverter

Потенциал виртуальной нейтрали равен

$$\varphi_0 = \frac{1}{3}(\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c).$$

Выходные ступенчатые напряжения для фазы «а» инвертора: $u_f = \varphi_a - \varphi_0$. Далее в частотной области, по схеме замещения на рис. 1, б, соотношению (1) и алгоритму (рис. 3) выполняется расчет гармоник тока инвертора:

$$\dot{i}_f^{(n)} = \frac{\dot{E}_a^{(n)} - \dot{U}_f^{(n)}}{\dot{Z}_f^{(n)}}. \quad (7)$$

Рассчитаем мощности в сечении сети и сечении нагрузки (табл. 1).

Расчет токовой загрузки инвертора АСФ

Расчет токовой загрузки инвертора включает в себя расчет мгновенных значений токов силовых полупроводниковых приборов, а также интегральные параметры – действующие и средние значения. Расчет токовой загрузки позволяет вычислить статические и динамические потери в инверторе АСФ.

В ранее проведенных исследованиях было показано, что мгновенные значения токов в силовых ключах инвертора можно вычислить путем перемножения их переключающих функций на фазный ток, спектр которого получен в (7) [27].

Для двухуровневого инвертора переключающая функция верхнего модуля определена выражением (5). Чтобы выделить переключающие функции отдельно диода и транзистора, учтем, что транзистор проводит при отрицательном направлении тока (от звена постоянного тока к сети), а диод – при положительном. Для этого введем переключающую функцию направления фазного тока, которая будет принимать единичное значение при положительном токе и нулевое – при отрицательном:

$$F_l = \frac{1}{2} \text{sign}(i_f) + \frac{1}{2}. \quad (8)$$

Тогда с учетом (5) и (8) вычислим мгновенные значения токов для двухуровневого инвертора:

$$i_{T1} = F_{sw} \cdot (1 - F_l) \cdot i_f, \quad i_{T2} = (1 - F_{sw}) \cdot F_l \cdot i_f;$$

$$i_{D1} = F_{sw} \cdot F_l \cdot i_f, \quad i_{D2} = (1 - F_{sw}) \cdot (1 - F_l) \cdot i_f.$$

Аналогичным образом из (6) и (8) получаем значения токов силовых полупроводниковых приборов и для трехуровневого инвертора:

$$i_{T1} = F_{sw1} \cdot (1 - F_l) \cdot i_f; \quad i_{T2} = F_{sw2} \cdot (1 - F_l) \cdot i_f;$$

$$i_{T3} = (1 - F_{sw1}) \cdot F_l \cdot i_f; \quad i_{T4} = (1 - F_{sw2}) \cdot F_l \cdot i_f;$$

$$i_{D1} = F_{sw1} \cdot F_l \cdot i_f; \quad i_{D2} = F_{sw1} \cdot F_l \cdot i_f;$$

$$i_{D3} = (1 - F_{sw2}) \cdot (1 - F_l) \cdot i_f;$$

$$i_{D4} = (1 - F_{sw2}) \cdot (1 - F_l) \cdot i_f;$$

$$i_{D5} = F_{sw2} \cdot (1 - F_{sw1}) \cdot (1 - F_l) \cdot i_f;$$

$$i_{D6} = (1 - F_{sw1}) \cdot (1 - F_{sw2}) \cdot F_l \cdot i_f.$$

На рис. 5 показаны примеры результатов расчета мгновенных значений токов в виде осциллограмм, построенных в пакете Mathcad.

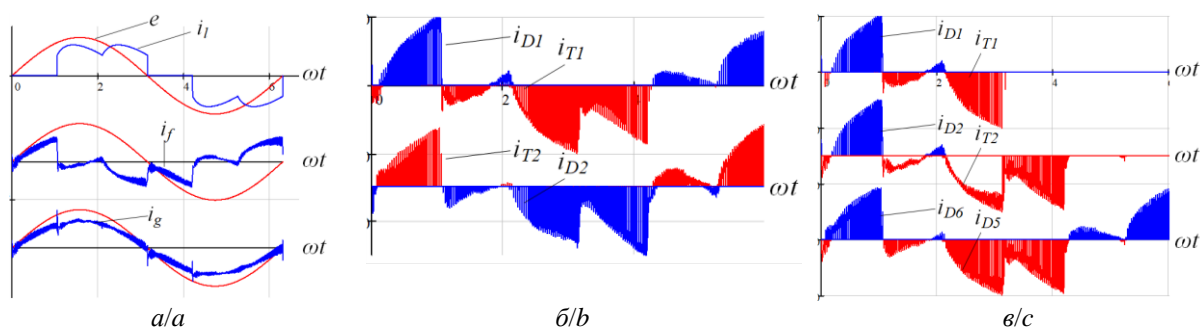


Рис. 5. Осциллограммы токов инвертора АСФ: а) работа АСФ при компенсации гармоник и реактивной мощности; б) токи силовых ключей АСФ на базе двухуровневого инвертора; в) токи силовых ключей АСФ на базе трехуровневого инвертора

Fig. 5. APF currents waveforms: a) APF operation when compensating harmonics and reactive power; b) power semiconductor currents for two-level inverter; c) power semiconductor currents for three-level inverter

Вычисление интегральных параметров токовой нагрузки силовых полупроводниковых приборов – средних и действующих значений – выполняется для каждого полупроводникового прибора по определению с учетом дискретности:

$$I_{avg} = \frac{1}{N} \sum_j i_T; \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j (i_T)^2},$$

где $j \in [0; N-1]$ – индекс элемента массива. Поскольку в дискретной математической модели во временной области все электрические переменные представлены одномерными массивами размера N , все вычисления во временной области выполняются над массивами поэлементно. Предполагается, что все переменные во временной области имеют индекс j , который во всех формулах опущен, чтобы не загромождать выражения и не затруднять их чтение.

Расчет мощности потерь в АСФ

Статические потери в силовых полупроводниковых приборах вычисляются по известному соотношению:

$$P_{cond} = I_{rms}^2 r_{on} + I_{avg} \cdot U_{on},$$

где r_{on} – дифференциальное сопротивление полупроводникового прибора в открытом состоянии; U_{on} – напряжение на открытом полупроводниковом приборе.

Наибольшую сложность представляет собой расчет динамических потерь, поскольку требуется корректный расчет количества коммутаций и учет амплитуды коммутируемого тока в ключе, что является нетривиальной задачей при несинусоидальной модуляции.

Выполним расчет динамических потерь, пользуясь базовым соотношением [30]:

$$E_{sw} = E_{swref} \cdot \left(\frac{I_k}{I_{k,ref}} \right)^{Ki} \cdot \left(\frac{U_{кз}}{U_{кз,ref}} \right)^{Kv} \times \left(1 + TC_{sw} (T_j - T_{jref}) \right), \quad (9)$$

где $E_{swref} = E_{onref} + E_{offref}$ – значения энергии включения и выключения, приведенные в справочных данных

при тестовых условиях; $I_{k,ref}$, $U_{кз,ref}$ – значения тока коллектора и напряжения коллектор–эмиттер, при которых производителем измерены значения E_{onref} и E_{offref} ; I_k , $U_{кз}$ – фактические значения тока коллектора и напряжения коллектор–эмиттер при коммутации; T_{jref} , T_j – тестовое и реальное значения температуры соответственно; Ki – степень зависимости энергии коммутации от тока коллектора (для IGBT $Ki \approx 1$, для обратного диода $Ki \approx 0,5 \dots 0,6$); Kv – степень зависимости энергии коммутации от обратного напряжения (для IGBT $Kv \approx 1,2 \dots 1,4$, для обратного диода $Ki \approx 0,6$); TC_{sw} – температурный коэффициент энергии коммутации (для IGBT $TC_{sw} \approx 0,003$, для обратного диода $TC_{sw} \approx 0,005 \dots 0,006$).

Мощность потерь на переключения вычислим как суммарную энергию переключения для транзистора и антипараллельного диода:

$$P_{sw} = f^{(1)} \sum_{N_{sw}} E_{sw}.$$

На каждом такте ШИМ коммутируемый ток отличается, поэтому отличается и энергия. Однако, в силу линейной зависимости энергии от тока, можно упростить расчет. Так как среднее значение энергии ком-

мутации $E_{sw,avg} = \frac{\sum E_{sw}}{N_{sw}}$, очевидно, что суммарную

энергию можно найти умножением средней энергии на число коммутаций: $\sum_{N_{sw}} E_{sw} = N_{sw} \cdot E_{sw,avg}$. Значе-

ние средней энергии коммутации получим из среднего значения коммутируемого тока, которое найдем в математической модели преобразователя. Среднее значение коммутируемого тока транзистора вычисляется как среднее значение гладкой составляющей тока транзистора в пределах такого интервала, на котором имеют место процессы коммутации транзистора или диода. На рис. 5, б видно, что в двухуровневом инверторе транзистор и диод коммутируются по половине периода основной гармоники, следовательно, для двухуровневого инвертора среднее значение коммутируемого тока можно определить из простого уравнения для диода и транзистора:

$$I_{T_{sw,avg}} = \frac{1}{N \cdot \Delta_{T_{sw}}} \sum_j [i_f \cdot (1 - F_I)],$$

$$I_{D_{sw,avg}} = \frac{1}{N \cdot \Delta_{D_{sw}}} \sum_j [i_f \cdot F_I], \quad (10)$$

где $\Delta_{T_{sw}}$ и $\Delta_{D_{sw}}$ – относительные длительности интервалов, на которых имеются коммутации, которые в данном случае равны половине периода основной гармоники.

В трехуровневом инверторе интервалы коммутации более сложные (рис. 5, в). Их можно вычислить, используя переключающие функции фазного тока (F_I) и напряжения (F_U). Средние коммутируемые токи и относительные длительности интервалов коммутации для транзисторов верхнего плеча (T_1, T_2, D_1, D_2, D_5) трехуровневого инвертора (рис. 4, б):

$$I_{T1sw,avg} = \frac{1}{\Delta_{T1sw,avg} \cdot N} \sum_j [i_f (1 - F_I) F_U],$$

$$\Delta_{T1sw,avg} = \frac{1}{N} \sum_j (1 - F_I) F_U;$$

$$I_{T2sw,avg} = \frac{1}{\Delta_{T2sw,avg} \cdot N} \sum_j [i_f (1 - F_I) (1 - F_U)],$$

$$\Delta_{T2sw,avg} = \frac{1}{N} \sum_j (1 - F_I) (1 - F_U);$$

$$I_{D1,2sw,avg} = \frac{1}{\Delta_{D1,2sw,avg} \cdot N} \sum_j [i_f F_I F_U],$$

$$\Delta_{D1,2sw,avg} = \frac{1}{N} \sum_j F_I F_U;$$

$$I_{D5sw,avg} = \frac{1}{\Delta_{D5sw,avg} \cdot N} \sum_j [i_f (1 - F_I)],$$

$$\Delta_{D5sw,avg} = \frac{1}{N} \sum_j F_I. \quad (11)$$

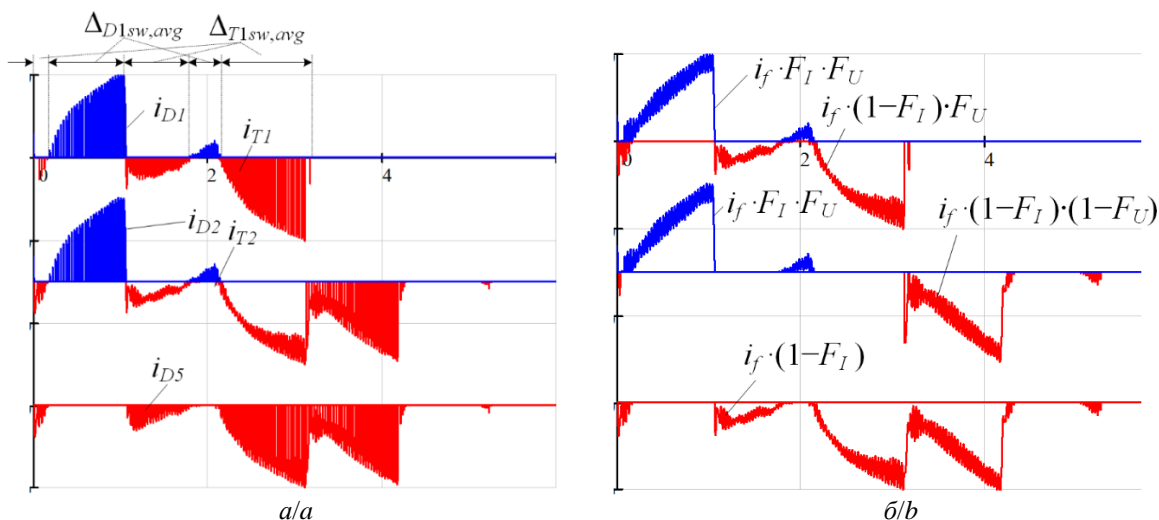


Рис. 6. Эпюры токов силовых транзисторов и диодов: а) мгновенные значения; б) огибающая для расчета среднего коммутируемого тока

Fig. 6. Waveforms of the power semiconductor currents: a) real currents; b) amplitude envelopes

На рис. 6, а представлены эпюры токов транзисторов и диодов верхнего плеча с обозначением интервалов коммутации и их составляющих, на рис. 6, б – огибающие амплитуд импульсов токов силовых ключей на интервалах коммутации.

Для расчета суммарной энергии коммутации за период основной гармоники необходимо знать количество коммутаций. Для трехуровневого инвертора нужно умножить количество тактов ШИМ на всем периоде (т. е. на кратность ШИМ) на относительную длительность интервала с коммутациями:

$$N_{T1sw} = \Delta_{T1sw,avg} \cdot A,$$

$$N_{T2sw} = \Delta_{T2sw,avg} \cdot A,$$

$$N_{D1,2sw} = \Delta_{D1,2sw,avg} \cdot A,$$

$$N_{D5sw} = \Delta_{D5sw,avg} \cdot A. \quad (12)$$

Подставляя (10)–(12) в (9) и используя справочные данные, вычислим среднюю энергию коммутации для каждого переходного процесса в транзисторах и диодах инверторов. Суммируя энергии включения, умножая на количество коммутаций за период и на частоту основной гармоники, получаем мощность коммутационных потерь для двухуровневого инвертора:

$$P_{sw,2L} = 6 \cdot f^{(1)} (E_{swT} \cdot N_{swT} + E_{swD} \cdot N_{swD}).$$

Для трехуровневого инвертора:

$$P_{sw3L} = 6 f^{(1)} \left(E_{swT1} N_{T1sw} + E_{swT2} N_{T2sw} + 2E_{swD12} N_{D1,2sw} + E_{swD5} N_{D5sw} \right).$$

Помимо статических и динамических потерь существенный вклад вносят и активные потери в фильтре ШИМ-гармоник, которые можно приближенно оценить по выражениям:

- $P_f = 3I_{f,rms}^2 \cdot r_f$ – для фильтров первого порядка (L -фильтр) (рис. 7, а);
- $P_f = 3(I_{g,rms}^2 \cdot R_g + I_{f,rms}^2 \cdot R_f + I_{c,rms}^2 \cdot R_c)$ – для фильтра третьего порядка (LCL -фильтр) (рис. 7, б).

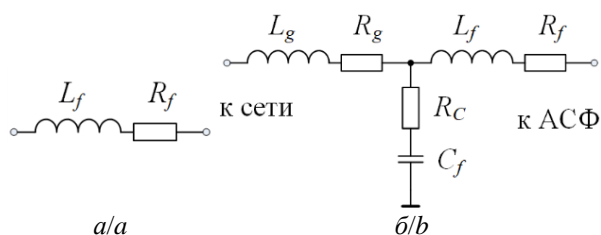


Рис. 7. Фильтры ШИМ-гармоник: а) фильтр первого порядка; б) фильтр третьего порядка

Fig. 7. PWM-harmonic filters: a) first order filter; b) third order filter

Тогда суммарные потери в АСФ будут складываться из трех составляющих:

$$P_{APF} = \sum P_{cond} + \sum P_{sw} + P_f.$$

КПД и энергетические характеристики АСФ

Расчет КПД есть отношение полезной мощности к полной. Для понимания этих составляющих необходимо адекватное определение полезной мощности с точки зрения АСФ. Работа последнего кардинально отличается от типовых систем электропитания, где идет односторонняя передача активной мощности в нагрузку. В АСФ и других подобных устройствах (статические компенсаторы, компенсаторы реактивной мощности и др.) осуществляется обмен электромагнитной энергией с сетью, т. е. как такового потребления активной мощности нет, за исключением потерь. В то же время АСФ не работает без нагрузки в сети. Поэтому автором предлагается за *полезную мощность принять активную мощность, потребляемую нагрузкой по основной гармонике* $P_1^{(1)}$. Высшие гармоники и реактивная мощность, потребляемые нагрузкой от сети, компенсируются АСФ. *Потери в АСФ в сумме с полезной мощностью предлагается принять за полную мощность.* Таким образом, предлагается следующее определение КПД для АСФ:

$$\eta_{APF} \equiv \frac{P_1^{(1)}}{P_1^{(1)} + P_{APF}}. \quad (13)$$

Помимо КПД предлагается оценивать эффективность компенсации реактивной мощности, мощности искажения:

1. *Коэффициент полной мощности* η_D как отношение полной мощности в сечении сети S_g к полной мощности в сечении нагрузки S_l . Этот показатель отражает, во сколько раз снижается полная мощность, потребляемая из сети, за счет компенсации ее *неактивных* составляющих (реактивная мощность и мощность искажения):

$$\eta_S \equiv \frac{S_g}{S_l}. \quad (14)$$

Максимальное значение показателя равно единице, когда компенсация отсутствует. Чем ниже значение, тем эффективнее работа АСФ.

2. *Коэффициент реактивной мощности* η_D – отношение реактивной мощности в сечении сети к реактивной мощности в сечении нагрузки:

$$\eta_Q \equiv \frac{Q_g}{Q_l}. \quad (15)$$

При наличии реактивной нагрузки и отсутствии компенсации $\eta_D=1$, что говорит об отсутствии компенсации реактивной мощности. При полной компенсации реактивной мощности $\eta_D=0$. При отсутствии потребления реактивной мощности нагрузкой η_D также приравнивается к нулю.

3. *Коэффициент мощности искажения* η_D – отношение мощности искажения в сечении сети к мощности искажения в сечении нагрузки:

$$\eta_D \equiv \frac{D_g}{D_l}. \quad (16)$$

При наличии нелинейной нагрузки и отсутствии компенсации $\eta_D=1$, что говорит об отсутствии компенсации мощности искажения. При полной компенсации мощности искажения $\eta_D=0$. При отсутствии потребления мощности искажения нагрузкой η_D также приравнивается к нулю.

Предложенные показатели энергетической эффективности призваны не заменить имеющиеся, а дополнить их. Таким образом, эффективность работы АСФ предлагается оценивать как традиционными показателями (коэффициент гармоник тока в сечении сети, коэффициент мощности в сети), так и введенными в выражениях (13)–(16). Отметим, что на данный момент введенные энергетические показатели справедливы для неискаженной формы сетевого напряжения. В случае искажения сетевого напряжения возникает сразу несколько различных ситуаций, которые требуют отдельного рассмотрения и будут исследованы в будущих публикациях. В рамках данной работы выполним математическое и имитационное моделирование работы АСФ и проведем комплексную оценку его энергетической эффективности в различных конфигурациях структуры АСФ.

Моделирование работы АСФ

Для проверки полученных результатов было выполнено имитационное моделирование работы АСФ на нелинейную нагрузку в пакете моделирования Matlab Simulink. Для моделирования был выбран наиболее сложный по конфигурации вариант АСФ – на базе трехуровневого инвертора напряжения с фильтром ШИМ-гармоник третьего порядка. Параметры модели приведены в табл. 2.

При моделировании были проведены следующие измерения:

- мгновенные значения токов в точке общего присоединения;
- мгновенные значения токов IGBT-модулей инвертора;
- интегральные параметры токовой загрузки IGBT-модулей инвертора;
- полная, активная, реактивная мощности и мощность искажения на стороне нагрузки и сети;
- КПД и коэффициенты мощностей по выражениям (13)–(16).

На рис. 8, а представлены осциллограммы мгновенных значений в точке общего присоединения: напряжение сети (e), ток нагрузки (i_l), ток АСФ (i_f) и ток сети (i_g) после компенсации высших гармоник и реактивной мощности, полученные в математической модели. На рис. 8, б – те же осциллограммы, измеренные в модели Matlab Simulink.

На рис. 9, а приведены осциллограммы токов силовых полупроводниковых приборов, построенные в математической модели; на рис. 9, б – те же осциллограммы, измеренные в Matlab.

В табл. 3 приведены интегральные параметры тиковой нагрузки силовых ключей верхнего плеча трехуровневого инвертора АСФ, рассчитанные в математической модели и измеренные в Matlab.

Из анализа табл. 3 видно, что значения интегральных параметров токовой нагрузки полупроводниковых приборов, рассчитанные в математической модели, в целом соответствуют измеренным в имитационной модели.

В табл. 4 приведены значения показателей энергетической эффективности.

Таблица 2. Параметры имитационной модели

Table 2. Simulation model parameters

Параметр/Parameter	Значение/Value
Шаг моделирования/Time step	$1 \cdot 10^{-7}$ с/s
Сеть/AC mains	
Конфигурация сети/Grid configuration	Трёхфазная симметричная/Three-phase symmetrical
Высшие гармоники в напряжении сети Higher harmonics in the grid voltage	Нет/No
Действующее фазное напряжение, В AC rms voltage	220 В/V
Нагрузка/Load	
Схема нагрузки/Load circuit	Трёхфазный мостовой тиристорный выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой Three-phase full bridge rectifier with RL-load
Входной импеданс (имитация трансформатора) Input impedance	$L_l=0,1$ мГн/mH, $R_l=1$ мОм/mOhm
Выходной импеданс нагрузки Load output impedance	$L_d=1$ мГн/mH, $R_d=2$ Ом/Ohm
Мощность нагрузки/Load power	$P_d=94,4$ кВт/kW
Угол управления/Firing angle	$\alpha=30^\circ$
АСФ/APF	
Инвертор/VSI type	Трёхфазный трехуровневый на базе IGBT/Three-phase three-level IGBT-based VSI
Конденсаторы звена постоянного тока DC-link capacitors	2 x 20000 мкф/ μ F
Фильтр ШИМ-гармоник/PWM-harmonic filter	рис. 7, б/fig. 7, b
Параметры фильтра/Filter parameters	$L_g=L_f=0,05$ мГн/mH, $C_f=10$ мкф/ μ F $R_g=R_f=R_c=0,01$ Ом/Ohm, $f_0=10066$ Гц/Hz
Частота ШИМ/PWM frequency	$f_{PWM}=20$ кГц/kHz
Напряжение звена постоянного тока DC-link voltage	$U_{dc}=800$ В/V
Параметры IGBT модуля/IGBT parameters [32]	$U_{T,on}=1$ В/V, $U_{D,on}=1$ В/V, $r_{on}=4$ мОм/mOhm

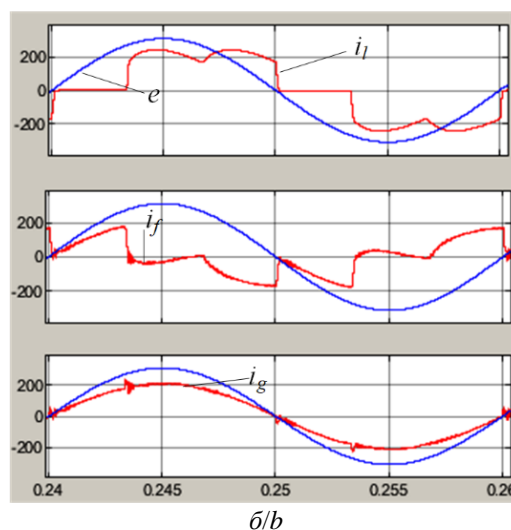
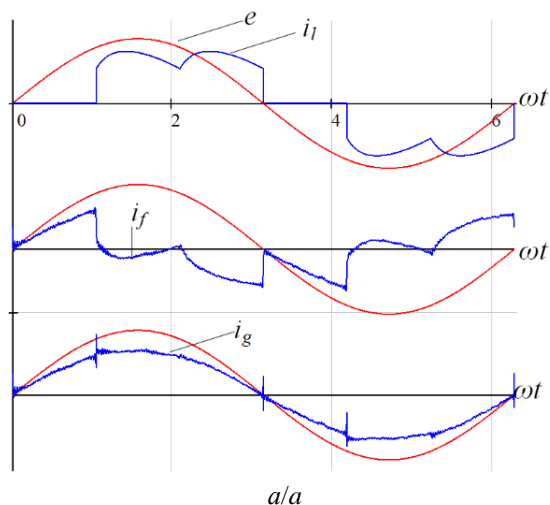


Рис. 8. Осциллограммы в точке общего присоединения
Fig. 8. Waveforms in the point of common coupling

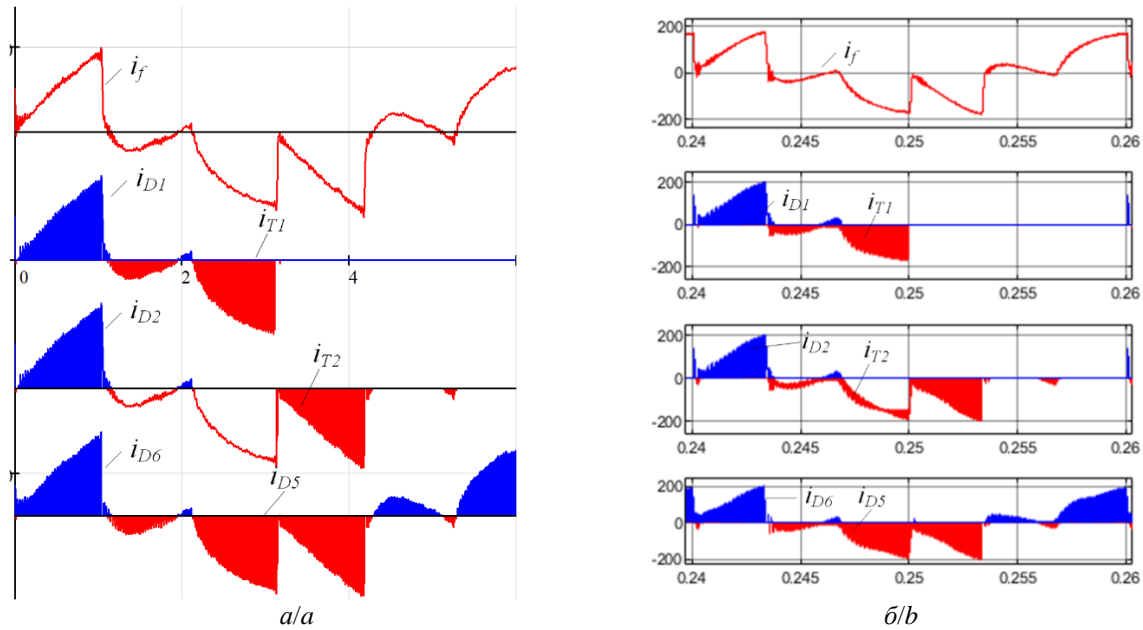


Рис. 9. Осциллограммы токов силовых ключей
 Fig. 9. Power switches currents

Таблица 3. Расчет и измерение интегральных параметров токовой загрузки
 Table 3. Calculated and measured average and root-mean-square values

Транзистор/диод Transistor/diode	Значение тока, А Current value, A	Расчет Calculated	Измерение в модели Simulated
T_1	Среднее/Average	8,36	8,70
	Действующее/rms	28,77	29,18
D_1, D_2	Среднее/Average	8,72	8,79
	Действующее/rms	35,25	34,93
T_2	Среднее/Average	31,82	32,45
	Действующее/rms	62,24	63,03
D_5	Среднее/Average	23,46	23,75
	Действующее/rms	55,19	55,83

Таблица 4. Показатели энергетической эффективности
 Table 4. Energy and power quality factors

Показатель/Value	Расчет в математической модели Calculated in mathematic model	Измеренные в имитационной модели Measured in simulation model
Коэффициент гармоник тока нагрузке, %/Load THD, %	31,82	30,94
Коэффициент гармоник тока в сети, %/Grid current THD, %	0,01	4,97
Коэффициент сдвига (cosφ) в нагрузке/Load DPF	0,873	0,86
Коэффициент сдвига (cosφ) в сети/Grid DPF	1,0	1,0
Полная мощность нагрузки, кВА/Load apparent power, kVA	114,9	117,2
Полная мощность в сети, кВА/Grid apparent power, kVA	100,4	98,03
Активная мощность нагрузки, кВт/Load active power, kW	100,4	96,54
Активная мощность в сети, кВт/Grid active power, kW	100,4	97,9
Реактивная мощность в нагрузке, кВАр Load reactive power, kVAr	55,9	56,71
Реактивная мощность в сети, кВАр/Grid reactive power, kVAr	0	0
Мощность искажения в нагрузке, кВА Load distortion power, kVA	0,689	34,65
Мощность искажения в сети, кВА/Grid distortion power, kVA	0	4,87
Мощность потерь в фильтре ШИМ-гармоник АСФ, кВт PWM harmonic filter losses, kW	0,617	0,616
Статические потери в инверторе АСФ, кВт APF conduction losses, kW	0,966	0,748
Динамические потери в инверторе АСФ, кВт APF switching losses, kW	1,808	–
Суммарная мощность потерь в АСФ, кВт APF total power losses, kW	3,39	1,364
КПД АСФ, %/APF efficiency, %	96,96	98,61
Коэффициент полной мощности/Аpparent power factor	0,873	0,836
Коэффициент реактивной мощности/Reactive power factor	0	0
Коэффициент мощности искажения/Distortion power factor	0	0,14

Энергетические показатели, приведенные в табл. 4, в целом соответствуют измеренным на имитационной модели. Есть ряд нюансов, заслуживающий отдельного внимания:

- Активная мощность в нагрузке и в сети в математической модели совпадают, так как в математической модели при расчете токов было принято допущение об идеальности силовых ключей инвертора АСФ и отсутствии в нем активных потерь, в то время как в имитационной модели заданы статические параметры силовых ключей и потери в сети учитывают потери в АСФ (статические потери инвертора и потери в фильтре).
- Модель инвертора в пакете Matlab Simulink не учитывает динамику работы силовых полупроводниковых приборов, и, как следствие, в ней отсутствуют динамические потери, что существенно занижает значение суммарных потерь в инверторе.
- Следствием всего этого является существенная разница в значении мощности искажения, которая вычисляется как геометрическая разность полной мощности, активной и реактивной мощностей.
- Разница в расчетном и измеренном КПД обусловлена отсутствием учета динамических потерь в модели инвертора АСФ в пакете моделирования Matlab Simulink.

Заключение

Представленный математический аппарат, основанный на методе переключающих функций и спектральном методе, позволяет вычислять все электрические переменные для оценки энергетической эффективности активных силовых фильтров – мгновенные значения и интегральные параметры. Составленная на его основе математическая модель системы «сеть–АСФ–нагрузка» позволяет оценить энергетическую эффективность работы АСФ. Ключевым преимуществом данного способа расчета и анализа электромагнитных процессов является то, что вне зависимости

от схемотехники АСФ трудоемкость математических операций существенно не меняется. Имитационное моделирование в пакете Matlab Simulink показало качественное и количественное сходство результатов. В то же время моделирование в Matlab занимает порядка 10 минут на ПК средней производительности, в то время как на расчет математической модели в Mathcad уходит не более 1 минуты.

Предложенный способ расчета КПД адекватно оценивает работу АСФ, соотнося потери в нем с полезной мощностью, которой является активная мощность нагрузки.

Открытым на данный момент остается ряд вопросов, связанных с исследованием данного показателя для различных случаев нагрузки по ее величине, характеру (нелинейная, реактивная), алгоритму компенсации в условиях гармонических искажений формы напряжения сети. Аналогичный вывод касается и других введенных в работу коэффициентов: их знание позволяет судить о степени компенсации той или иной составляющей полной мощности в рамках теории мощности по С. Budeanu [33]. В то же время при искаженной форме напряжения сети возникают сразу несколько вопросов, связанных с адекватной оценкой этих мощностей. В этом случае целесообразно оценивать энергетические показатели, опираясь на, например, теорию мгновенной мощности Н. Akagi [31] или на теорию физических составляющих токов Л. Чарнецкого [34]. Эти вопросы будут детально исследованы в будущих публикациях.

В целом представленные энергетические показатели в дополнение к уже имеющимся образуют адекватный базис энергетических показателей, позволяющий дать достаточно полное представление об эффективности работы АСФ или подобного ему устройства в различных режимах. Введенные показатели энергетической эффективности могут быть распространены на компенсаторы реактивной мощности, последовательные компенсирующие и фильтро-компенсирующие устройства и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики / В.Х. Бердин, А.О. Кокорин, Г.М. Юлкин, М.А. Юлкин. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. – 80 с.
2. Постановление правительства Российской Федерации № 198 от 7 мая 2000 г. // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=201001273&rdk=&backlink=1> (дата обращения 21.10.2022).
3. Энергоснабжение изолированных территорий / В. Гимди, А. Курдин, Д. Нестер, А. Амирагян и др. // Энергетический бюллетень аналитического центра при правительстве Российской Федерации № 51. – август 2017. – 28 с.
4. Средние цены на бензин в городах России. URL: <https://fuelprices.ru/ceny-na-benzin-v-gorodah-rossii> (дата обращения 21.10.2022).
5. Цены месяца // Приложение к журналу «ТЭК России» № 12. – 2021. URL: https://www.cdu.ru/upload/medialibrary/54c/f0soj1ffdr4tsebwhxjw8qz1kbigk5a/Prices_12_2021.pdf (дата обращения 21.10.2022).
6. Электромагнитная совместимость потребителей. Монография / И.В. Жежеленко, А.К. Шилдовский, Г.Г. Пивняк, Ю.Л. Саенко, Н.А. Нойберггер. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
7. Electrical power systems quality / R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty. – New York: McGraw-Hill Education, 2004. – 521 p.
8. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
9. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
10. Khan S., Singh B., Makhija P. A review on power quality problems and its improvement techniques // 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). – Vellore, 2017. – P. 1–7.
11. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
12. Перечень критических технологий Российской Федерации от 7 июля 2011 года // Сайт Администрации Президента России. URL: <http://kremlin.ru/supplement/988> (дата обращения 21.10.2022).
13. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года // Сайт аналитического центра при Правительстве Российской Федерации. URL: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf> (дата обращения 21.10.2022).

14. Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики» в редакции от 18.10.2019 № 321 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102424400&acklink=1&&nd=102349663> (дата обращения 21.10.2022).
15. Abramovich B.N., Sychev Y.A. The evaluation of hybrid active filter efficiency // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov, Russia, 2016. – P. 1–7.
16. Energy efficiency criterion of Power Active Filter in a three-phase network / O. Plakhtii, V. Nerubatskiy, Ya. Scherbak, A. Mashura, I. Khomenko // IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – Kharkiv, Ukraine, 2020. – P. 165–170.
17. Wang L., Lam C.-S., Wong M.-C. The analysis of DC-link voltage, compensation range, cost, reliability and power loss for shunt (hybrid) active power filters // 2018 IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – Sabah, Malaysia, 2018. – P. 640–645.
18. Yadav S.K., Patel A., Mathur H.D. Study on comparison of power losses between UPQC and UPQC-DG // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2022. – V. 58. – № 6. – P. 7384–7395.
19. Dybko M.A., Brovanov S.V. A New method of current calculation in power semiconductor devices of diode-clamped multilevel VSC // Proc. of 3rd International Youth Conference on Energetics, IYCE 2011. – Leiria, Portugal, July 7–9, 2011. – P. 1–7.
20. Брованов С.В., Дыбко М.А. Расчет динамических потерь в многоуровневых полупроводниковых преобразователях с емкостным делителем напряжения // Доклады академии наук высшей школы РФ. – 2011. – № 2 (17). – С. 46–55.
21. Методика расчета динамических потерь мощности в полупроводниковых преобразователях на транзисторах типа MOSFET с векторным способом управления / М.А. Дыбко, Е.В. Гришанов, С.В. Брованов, В.Г. Токарев // Доклады АН ВШ РФ. – 2017. – № 3 (36). – С. 52–63. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-3-52-63
22. Analysis of power losses in a three-phase inverter 3L-NPC. Comparison with different PWM modulation techniques / J.S. Artal-Sevil, J.M. Lujano-Rojas, C. Bernal-Ruiz, I.S. Gorrachategui // XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEЕ). – La Laguna, Spain, 2018. – P. 1–9.
23. Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive // 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). – Algiers, Algeria, 2016. – P. 768–773.
24. Hafezi H., Faranda R. A new approach for power losses evaluation of IGBT/diode module // MDPI Electronics. – 2021. – V. 10. – № 3:280. – P. 1–22.
25. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Energy loss analysis in a SiC/IGBT propulsion inverter over drive cycles considering blanking time, MOSFET's reverse conduction and the effect of thermal feedback // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Detroit, MI, USA, 2020. – P. 1505–1511.
26. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses / G. Feix, S. Dieckerhoff, J. Allmeling, J. Schonberger // 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). – Barcelona, Spain, 2009. – P. 1–8.
27. Babaie A., Karami B., Abrishamifar A. Improved equations of switching loss and conduction loss in SPWM multilevel inverters // 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC). – Tehran, Iran, 2016. – P. 559–564.
28. Losses and thermal calculation of IGBT and FWD in PWM inverter for electric engineering maintenance rolling stock / C. Xi, H. Shenghua, L. Bingzhang, X. Yangxiao // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Chiba, Japan, 2016. – P. 1–5.
29. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Power loss analysis in a SiC/IGBT propulsion inverter including blanking time, MOSFET's reverse conduction and the effect of thermal feedback using a PMSM model // IECON The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Singapore, 2020. – P. 1424–1430.
30. Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules // Application Note AN 1403, 19.08.2014 URL: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-note-determining-switching-losses-of-semikron-igbt-modules-en-2014-08-19-rev-00/> (дата обращения 27.10.2022).
31. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE press series on power engineering. – New Jersey: John Wiley&Sons. 2017. – 432 p.
32. Infineon FF300R12ME7_B11 // IGBT module datasheet URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF300R12ME7_B11-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4627aa5d4f5017b10ad70463236 (дата обращения 27.10.2022).
33. Budeanu C.I. The different options and conceptions regarding active power in nonsinusoidal systems. – Bucharest: Institut Romain de l'Energie, 1927.
34. Czarniecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of power theory // International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation. – Lagow, Poland, 2008. – P. 1–11.

Поступила: 05.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 17.02.2023 г.

Информация об авторах

Дыбко М.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет.

UDC 621.314

ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF ACTIVE POWER FILTERS FOR POWER SUPPLY SYSTEMS USED IN THE NORTHERN AREAS

Maksim A. Dybko,
Raptor9000@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University,
20, bld. 4, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630037, Russia.

The relevance of the research is caused by the need of energy efficiency improvement at the power supply systems used in the northern areas, where the best part of the mining industry is located. In these regions power supply is provided by diesel generator units, gas-turbine generator units and water power plants. Lack of the centralized electricity and expensive fuel transportation have made the cost of the electrical energy ten times higher than in central regions. Plenty of the nonlinear and reactive loads results in poor power quality, reactive and distortion power losses. In order to minimize the nonlinear and reactive loads influence, active power filters are implemented. Typically, an active power filter is a voltage source inverter operating as a controlled current source. An active power filter installation requires substantial investments and, therefore, economic considerations must be taken into account. This, in its turn requires a comprehensive energy efficiency estimation of the active power filter operation to be done. Currently, there is no any unified approach to estimate the energy efficiency of an active power filter or similar power electronic device as well as no method to estimate its efficiency and possible economic effect of non-active power compensation. All of these makes the development of a mathematical model of the power supply system with an active power filter to be an actual problem.

The main aim is energy efficiency improvement in power supply systems of the northern areas by active power filter implementation.

Objects: power electron devices intended to electrical energy circulation between them and the grid, such as active power filters, STATCOMs, etc.

Methods. In order to achieve the aim of the research, several tasks were formulated. One of them is the mathematical approach to estimate the active power filter energy efficiency. This approach uses calculation based on spectral method and switching functions. The mathematical model is represented in a discrete form. It allows one to calculate all the currents and voltages in the power circuit of the active power filters, its rms and average values. A new approach to calculate the efficiency is proposed. It suggests to set the load active power as the useful power and the one plus the active power filters power losses as the total power. Besides, three new power quality factors are proposed to give an estimation of active power filter effectiveness concerning its influence on apparent power, reactive power and the distortion power.

Results. The active power filter energy quality performance is estimated qualitatively and quantitatively. Active power filter's converter currents are obtained as instantaneous values, rms and average values. Conduction and switching losses are calculated for 2-level and 3-level inverter based on active power filters circuit. New energy quality performance factors are defined as well as the active power filter efficiency. All the results obtained in the mathematical model are verified by the simulation model in Matlab Simulink software.

Key words:

Northern areas power supply, reactive power compensation, distortion power compensation, active power filter mathematical model, active power filter efficiency calculation.

REFERENCES

- Berdin V.Kh., Kokorin A.O., Yulkin G.M., Yulkin M.A. *Vozobnovlyaemye istochniki energii v izolirovannykh naselednykh punktakh Rossiyskoy Arktiki* [Renewable energy sources in isolated settlements of the Northern areas]. Moscow, World Wild Fund Publ., 2017. 80 p.
- Postanovlenie pravitelstva Rossiyskoy Federatsii № 198 ot 7 maya 2000 g. [Decree of the Russian Government No. 198 from 07.05.2000]. *Ofitsialny internet-portal pravovoy informatsii* [Official decree of the Russian Government No 198 from 7 May 2000]. Available at:
- <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=201001273&rdk=&backlink=1> (accessed 21 October 2022).
- Gimdi V., Kurdin A., Nester D., Amiragyan A. *Energosnabzhenie izolirovannykh territoriy* [Power supply of the isolated areas]. *Energeticheskii byulleten analiticheskogo tsentra pri pravitelstve Rossiyskoy Federatsii*, August 2017, no. 51, pp. 28.
- Srednie tseny na benzin v gorodakh Rossii* [Average petrol prices in Russian cities]. Available at: <https://fuelprices.ru/ceny-na-benzin-v-gorodah-rossii> (accessed 21 October 2022).
- Tseny mesyatsa. Prilozhenie k zhurnalu «TEK Rossii»* [Month prices. Appendix of the journal «FEC of Russia»]. 2021, no. 12. Available at: https://www.edu.ru/upload/medialibrary/54c/f0soj1ffdr4tse6ewhxiw8qz1kbikg5a/Prices_12_2021.pdf (accessed 21 October 2022).
- Zhezhelenko I.V., Shildovskiy A.K., Pivnyak G.G., Saenko Yu.L., Noyberger N.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost potrebiteley. Monografiya* [Electromagnetic compatibility of consumers. Monography]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 351 p.
- Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty H.W. *Electrical Power Systems Quality*. New York, McGraw-Hill Education, 2004. 521 p.
- Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher harmonics in the industrial power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 4th ed. 331 p.
- Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Energy quality performance and its control in industry]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
- Khan S., Singh B., Makhija P. A review on power quality problems and its improvement techniques. *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. Vellore, 2017. pp. 1–7.
- Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Power losses. Reactive power. Power quality: practical calculations manual]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p.
- Perechen kriticheskikh tekhnologiy Rossiyskoy Federatsii ot 7 iyulya 2011 goda [Critical Technologies List of Russian Federation from 07.07.2011]. *Official website of the Russia President Administration*. Available at: <http://kremlin.ru/supplement/988> (accessed 21 October 2022).
- Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda [Russia's Energy Strategy till 2035]. *Official website of the Russian's*

- Government Analytical Center*. Available at: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf> (accessed 21 October 2022).
15. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Razvitie energetiki» v redaktsii ot 18.10.2019 № 321 [State Program of Russian Federation «Energetics development» 18.10.2019 edition]. *Official website of the Russian's Government Law Information*. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102424400&backlink=1&&nd=102349663> (accessed 21 October 2022).
 16. Abramovich B.N., Sychev Y.A. The evaluation of hybrid active filter efficiency. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, Russia, 2016. pp. 1–7.
 17. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Scherbak Ya., Mashura A., Khomenko I. Energy efficiency criterion of Power Active Filter in a three-phase network. *IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020. pp. 165–170.
 18. Wang L., Lam C.-S., Wong M.-C. The analysis of DC-link voltage, compensation range, cost, reliability and power loss for shunt (hybrid) active power filters. *2018 IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Sabah, Malaysia, 2018. pp. 640–645.
 19. Yadav S.K., Patel A., Mathur H.D. Study on comparison of power losses between UPQC and UPQC-DG. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, vol. 58, no. 6, pp. 7384–7395.
 20. Dybko M.A., Brovanov S.V. A New method of current calculation in power semiconductor devices of diode-clamped multilevel VSC. *Proc. of 3rd International Youth Conference on Energetics, IYCE 2011*. Leiria, Portugal, July 7–9, 2011. pp. 1–7.
 21. Brovanov S.V., Dybko M.A. Raschet dinamiceskikh poter v mnogourovnevnykh poluprovodnikovykh preobrazovatelyakh s emkostnym delitelem napryazheniya [Switching losses calculation in multilevel NPC inverters]. *Doklady akademii nauk vysshey shkoly RF*, 2011, no. 2 (17), pp. 46–55.
 22. Dybko M.A., Grishanov E.V., Brovanov S.V., Tokarev V.G. Metodika rascheta dinamiceskikh poter moshchnosti v poluprovodnikovykh preobrazovatelyakh na tranzistorakh tipa MOSFET s vektornym sposobom upravleniya [Switching losses calculation technique in MOSFET VSI with space vector control]. *Doklady AN VSH RF*, 2017, no. 3 (36), pp. 52–63.
 23. Artal-Sevil J.S., Lujano-Rojas J.M., Bernal-Ruiz C., Gorra-chategui I.S. Analysis of power losses in a three-phase inverter 3L-NPC. Comparison with different PWM modulation techniques. *XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE)*. La Laguna, Spain, 2018. pp. 1–9.
 24. Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. *8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. Algiers, Algeria, 2016. pp. 768–773.
 25. Hafezi H., Faranda R. A new approach for power losses evaluation of IGBT/diode module. *MDPI Electronics*, 2021, vol. 10, no. 3:280, pp. 1–22.
 26. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Energy loss analysis in a SiC/IGBT propulsion inverter over drive cycles considering blanking time, MOSFET's reverse conduction and the effect of thermal feedback. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Detroit, MI, USA, 2020. pp. 1505–1511.
 27. Feix G., Dieckerhoff S., Allmeling J., Schonberger J. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses. *13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*. Barcelona, Spain, 2009. pp. 1–8.
 28. Babaie A., Karami B., Abrishamifar A. Improved equations of switching loss and conduction loss in SPWM multilevel inverters. *7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)*. Tehran, Iran, 2016. pp. 559–564.
 29. Xi C., Shenghua H., Bingzhang L., Yangxiao X. Losses and thermal calculation of IGBT and FWD in PWM inverter for electric engineering maintenance rolling stock. *19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Chiba, Japan, 2016. pp. 1–5.
 30. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Power loss analysis in a SiC/IGBT propulsion inverter including blanking time, MOSFET's reverse conduction and the effect of thermal feedback using a PMSM model. *IECON The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, 2020. pp. 1424–1430.
 31. *Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules*. Application Note AN 1403, 19.08.2014. Available at: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-note-determining-switching-losses-of-semikron-igbt-modules-en-2014-08-19-rev-00/> (accessed 27 October 2022).
 32. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. IEEE Press series on power engineering. New Jersey, John Wiley & Sons, 2017. 432 p.
 33. Infineon FF300R12ME7_B11. *IGBT module datasheet*. Available at: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF300R12ME7_B11-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4627aa5d4f5017b10ad70463236 (accessed 27 October 2022).
 34. Budeanu C.I. *The different options and conceptions regarding active power in nonsinusoidal systems*. Bucharest, Instytut Român de l'Energie, 1927.
 35. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of power theory. *International school on nonsinusoidal currents and compensation*. Lagow, Poland, 2008. pp. 1–11.

Received: 5 November 2022.
Reviewed: 17 February 2023.

Information about the authors

Maksim A. Dybko, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.