

ПОСТРОЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ПИТАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. В. Мятеж¹, П. С. Лисицын¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 630073, Россия

Аннотация: В работе решаются вопросы создания системы автономного питания предприятий горной промышленности, удаленных от центральной электроэнергетической системы. Предлагаемая система должна содержать накопители электроэнергии большой ёмкости и многоуровневые инверторы, построенные на основе полупроводниковых ключей и многообмоточных силовых трансформаторов, работающих на частоте промышленной сети 50 Гц. Исследуется возможность получения близких к синусоидальной форме напряжений переменного тока при помощи амплитудной модуляции токов и магнитных потоков в разветвленных электрических и магнитных цепях без использования общепринятой для обычных инверторов широтно-импульсной модуляции, учитывая её негативное влияние. Минимизация коэффициентов гармоник выходных напряжений автономных инверторов решается в рамках оптимизационной задачи, в которой предусматривается равномерная загрузка секций обмоток трансформаторов и определяется оптимальная ширина каждой ступени кривой выходного напряжения. Оценка эффективности полученных инверторов производится как аналитически, на основе вычисления коэффициентов гармоник, так и путем проведения модельных экспериментов. Исследования показали достижимость современных требований норм качества электрической энергии, установленных для сетей 0,38 кВ при использовании предлагаемого трехфазного инвертора с амплитудной модуляцией магнитных потоков, и перспективность его применения в качестве источника питания удаленных объектов промышленной инфраструктуры горных выработок, шахт и рудников.

Ключевые слова: амплитуда, ток, напряжение, магнитный поток, инвертор, широтно-импульсная модуляция, гармоника, модифицированный синус, обмотка трансформатора.

Для цитирования: Мятеж С. В., Лисицын П. С. Построение многоуровневых инверторов для системы автономного питания ответственных электроприемников предприятий горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 110–126. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_110.

Construction of multi-level inverters for an autonomous power supply system for responsible electric receivers of mining industry enterprises

S. V. Myatezh¹, P. S. Lisitsyn¹

¹ Novosibirsk State Technical University, K. Marx Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract: The paper addresses the issues of creating an autonomous power supply system for mining enterprises remote from the central electric power system. The proposed system should contain high-capacity electric energy storage devices and multilevel inverters built on the basis of semiconductor switches and multi-winding power transformers operating at a frequency of 50 Hz industrial network. The possibility of obtaining AC voltages close to a sinusoidal shape using amplitude modulation of currents and magnetic fluxes in branched electric and magnetic circuits without using the pulse-width modulation generally accepted for conventional inverters is investigated, taking into account its negative impact. The evaluation of the efficiency of the obtained inverters is carried out both analytically based on the calculation of the harmonic coefficients, and by conducting model experiments.

Key words: storage, energy, capacitance, transformer, capacitor, amplitude, current, voltage, magnetic flux, inverter, pulse-width modulation, harmonic, modified sine, transformer winding.

For citation: Myatezh S. V., Lisitsyn P. S. Construction of multi-level inverters for an autonomous power supply system for responsible electric receivers of mining industry enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):110–126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_110.

1. Введение.

Для промышленной инфраструктуры горных выработок, шахт и рудников, где имеются крупные потребители электрической энергии, в том числе шахтные электровозы с внешним источником питания, необходима надежная система электроснабжения. Поскольку само наличие электроэнергетической системы ввиду её удаленности от значительного количества месторождений не гарантирует процесс бесперебойной работы понижающих подстанций, целесообразно предусмотреть возможность автономного питания от современных аккумуляторных батарей большой ёмкости [1–3]. Для этого необходимо решить вопросы преобразования постоянного тока в переменный ток промышленной частоты и получения питающего напряжения практически синусоидальной формы с малым уровнем высших гармоник в соответствии с требованиями к качеству электрической энергии [ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ. 2014. — 16 с].

Типовые преобразователи постоянного тока в переменный ток синусоидальной формы строятся, как правило, на основе инверторов с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Однако кривая напряжения в таких инверторах представляет собой набор прямоугольных высокочастотных импульсов с большой амплитудой и характеризуется богатым спектром высших гармоник. В системе электроснабжения инверторы большой мощности будут создавать значительные электромагнитные помехи, которые ухудшат электромагнитную совместимость, вызовут дополнительные потери, приведут к ускоренному износу изоляции электрических машин и трансформаторов [4, 5].

Приближение к синусоидальной форме кривых напряжений инверторов может быть реализовано не только за счет модуляции периода отдельных импульсов, как при ШИМ, но и за счет модуляции амплитуды этих импульсов. Для этого необходимо располагать разными уровнями напряжений постоянного тока, из которых создается ступенчатая кривая и формируется модифицированный синус. Так работают

многоуровневые инверторы, разные уровни напряжений в которых получены за счет цепочек последовательно соединенных конденсаторов, работающих как ёмкостные делители напряжения. Однако эти инверторы имеют ряд недостатков: проблема балансировки напряжений на конденсаторах при работе с динамичной нагрузкой, сложные алгоритмы ШИМ, ограничения по режимным параметрам и массогабаритным показателям, особенно существенные для инверторов большой мощности [6–8].

Поэтому при создании системы бесперебойного питания на стороне понижительных подстанций для ответственных потребителей переменного тока предприятий горной промышленности, а также для надежной работы тяговых подстанций шахтных электровозов, необходимо решать задачи по совершенствованию перспективных многоуровневых инверторов.

2. Работа силовых трансформаторов в режиме инвертирования

Процесс инвертирования тока представляет собой процесс, обратный его выпрямлению, поэтому при построении рациональных схемотехнических решений инверторов будут полезны основы теории структурного синтеза выпрямителей [9]. Для получения разных уровней напряжений вместо цепочек заряженных конденсаторов можно предусмотреть отпайки многообмоточных трансформаторов. Такие трансформаторы для инвертора будут одновременно использоваться как средство изменения величины напряжения и как необходимая гальваническая развязка при объединении систем постоянного и переменного тока.

Однако режимы работы силовых трансформаторов при выпрямлении тока и при его инвертировании принципиально отличаются.

Так, в классических выпрямителях первичные обмотки трансформаторов получают питание от синусоидальных источников электрической энергии, а знакопеременный ток вторичных обмоток с синусоидальными формами электродвижущей силы (ЭДС) коммутируется с частотой f питающей сети при помощи силовых полупроводниковых приборов (СПП) для получения знакопостоянного тока. Следовательно, обмотки трансформаторов в режиме выпрямления работают с синусоидальными напряжениями, в то время как форма токов, протекающих по этим обмоткам, диктуется их собственным сопротивлением и сопротивлением нагрузки, и для выраженного индуктивного характера может в пределе иметь прямоугольную форму [17].

Если перевести выпрямитель в режим инвертирования, то к первичным обмоткам трансформаторов будет поступать питание от источников постоянной ЭДС (например, аккумуляторных батарей), которые в этом случае необходимо коммутировать с помощью СПП, меняя их полярность подключения также с частотой f .

Таким образом, первичные обмотки трансформаторов в режиме инвертирования вынужденно работают с напряжениями прямоугольной формы, в то время как ЭДС на выходных обмотках должны иметь форму, близкую к синусоидальной. Однако в режиме инвертирования без применения дополнительных мер не имеется благоприятных факторов формирования кривой ЭДС синусоидальной формы на выходных обмотках трансформаторов.

Простой анализ показывает, что пренебрегая потерями в стали [10] и установив связь напряжений и токов первичной и вторичной обмотки двухобмоточного трансформатора (рис. 1,

а) в соответствии с известной системой уравнений (1)

$$\begin{aligned} i_1(t)R_1 + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt} &= u_1(t), \\ i_2(t)R_2 + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - M \frac{di_1(t)}{dt} &= -u_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

при питании от источника с синусоидальной формой ЭДС $u_1(t) = U \sin(2\pi ft)$ токи обмоток в общем виде запишутся как

$$\begin{aligned} i_1(t) &= A_1 e^{-A_2 t} + A_3 \sin(2\pi ft + \phi_A), \\ i_2(t) &= B_1 e^{-B_2 t} + B_3 \sin(2\pi ft + \phi_B), \end{aligned} \quad (2)$$

где коэффициенты A_i , B_i в системе (2) определены параметрами схемы замещения (рис. 1, б), и после завершения короткого переходного процесса эти токи примут синусоидальную форму (рис. 2, а).

В случае питания первичной обмотки трансформатора знакопеременным напряжением $u_1(t) = \pm U_+$, полученным путем коммутации при помощи СПП силовых цепей источника постоянной ЭДС с напряжением U_+ , токи в общем виде запишутся как

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \pm (C_0(t) + C_1 e^{-C_2(t)} + C_3 e^{C_4(t)}), \\ i_2(t) &= \pm (D_1 e^{D_2(t)} + D_3 e^{-D_4(t)}) \end{aligned} \quad (3)$$

и будут иметь характерную экспоненциальную форму (рис. 2, б).

Компоненты $C_i(t)$, $D_i(t)$ в системе (3) определяются параметрами схемы

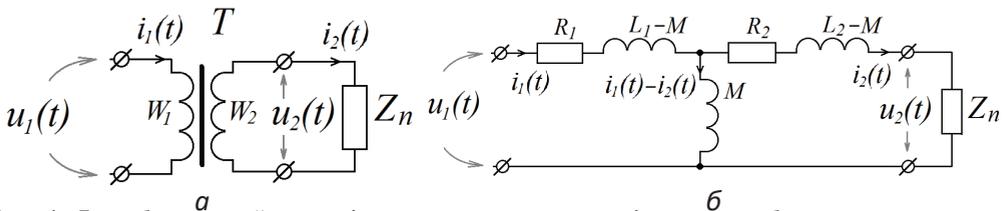


Рис. 1. Двухобмоточный трансформатор: а – схема подключения; б – расчетная схема замещения без индуктивных связей обмоток

Fig. 1. Two-winding transformer: а – connection diagram; б – design equivalent circuit without inductive connections of windings

замещения (рис. 1, б) и относительными длительностями положительной и отрицательной полярности подключения первичной обмотки относительно полюсов источника постоянной ЭДС.

3. Улучшение формы выходного напряжения

В первом приближении можно улучшить формы кривых на рис. 2, б, избегая ШИМ и варьируя только длительностью однократного подключения первичной обмотки к источнику постоянной ЭДС за один рабочий период (рис. 3). Для количественной оценки степени приближения формы кривой к синусоиду можно принять коэффициент гармоник $K_{ГУ}$, определив его как отношение среднеквадратичного значения суммы высших гармоник, кроме первой, к значению первой гармоники [11]. Так, для кривой напряжения $u(t)$.

$$K_{ГУ} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}, \quad (4)$$

где U_1 – действующее значение первой гармоники напряжения, U_k – действующие значения высших гармоник напряжения.

В соответствии с обозначениями на рис. 3, б и полупериодной симметрией действующее значение первой гармоники U_1 напряжения $u(t)$.

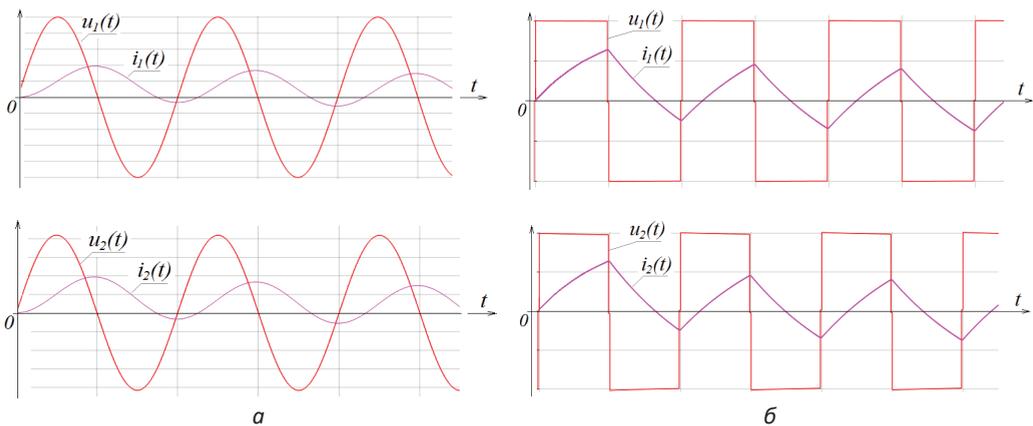


Рис. 2. Кривые напряжений и токов двухобмоточного трансформатора: а – при питании от источника синусоидального напряжения; б – при питании от источника с постоянной ЭДС

Fig. 2. Curves of voltages and currents of a two-winding transformer: a – when powered by a sinusoidal voltage source; b – when powered from a source with a constant EMF

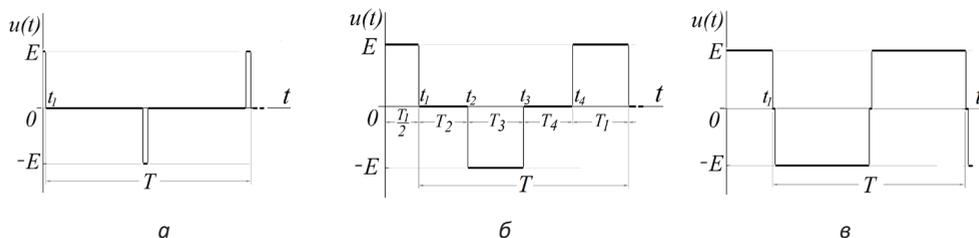


Рис. 3. Вариация длительности подключения первичной обмотки трансформатора к источнику постоянной ЭДС: а – длительность подключения минимальна; б – длительность подключения 50%; в – длительность подключения приближена к 100%

Fig.3- Variation in the duration of the connection of the primary winding of the transformer to the source of constant EMF: a – the duration of the connection is minimal; b – connection duration 50%; c – connection duration is close to 100%

$$U_1 = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(\omega t) dt = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} u(t) \cos(\omega t) dt = \frac{4\sqrt{2}E \sin(\omega t_1)}{\omega T}. \quad (5)$$

Действующее значение кривой напряжения $u(t)$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{t_1} E^2 dt + \frac{2}{T} \int_{t_2}^{T/2} (-E)^2 dt} = 2E \sqrt{\frac{t_1}{T}}. \quad (6)$$

Отсюда действующее значение высших гармоник напряжений

$$U_{\Sigma k} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2} = \sqrt{U^2 - U_1^2} = 2E \sqrt{\frac{t_1}{T} - \left(\frac{2\sqrt{2}}{\omega T} \sin(\omega t_1) \right)^2}. \quad (7)$$

Таким образом, коэффициент гармоник кривой напряжения по выражению (4) при варьировании длительности подключения первичной обмотки к источнику постоянной ЭДС определяется следующим образом

$$K_{ГУ} = \frac{\sqrt{\frac{t_1}{T} - \left(\frac{2\sqrt{2}}{\omega T} \sin(\omega t_1)\right)^2}}{\frac{2\sqrt{2}}{\omega T} \sin(\omega t_1)}. \quad (8)$$

Улучшение формы кривой решает оптимизационная задача, целевая функция которой выражается как $K_{ГУ} \rightarrow \min$.

Поиск минимума выражения (8) показывает (рис. 4, а), что существует оптимальное время $t_1 \approx 0,371\pi$, определяющее такую длительность подключения первичной обмотки $t = 2 \cdot t_1 \approx 134^\circ$,

когда без применения ШИМ и фильтровых устройств минимально возможный коэффициент гармоник напряжения составит $K_{ГУ} \approx 29,5\%$ [18].

Кривая $u(t)$ при этом должна содержать нулевые ступени. Их целесообразно создать путем отключения первичной обмотки от источника постоянной ЭДС и замыкания её самой на себя при помощи СПП для сохранения путей протекания тока в индуктивных элементах. Ширина нулевых ступеней составит $T_2 = 1 - 2 \cdot t_1 \approx 0,258\pi \approx 46^\circ$, как это видно на рис. 4, б.

Если для полученного результата задействовать возможности амплитудной модуляции, которая дает разные уровни напряжений в ступенчатой форме, то величину $K_{ГУ} \approx 29,5\%$ можно существенно снизить.

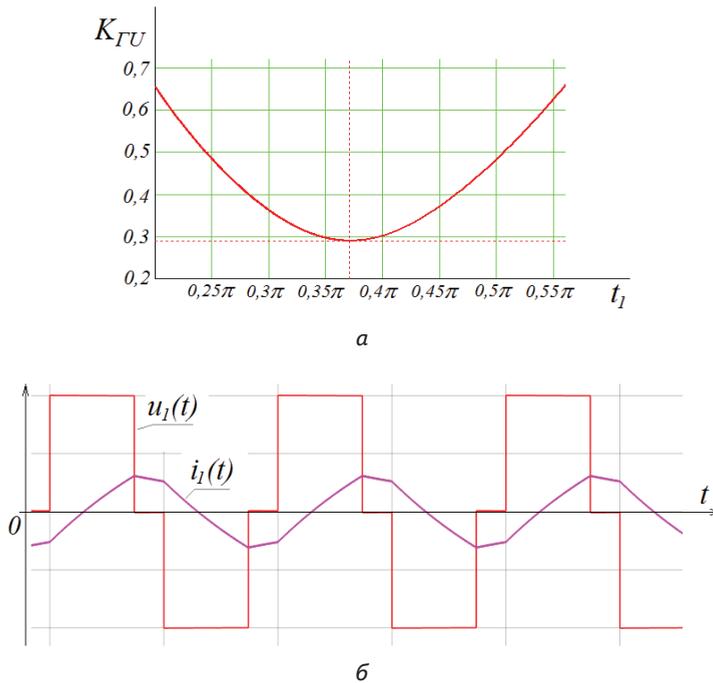


Рис.4. Получение оптимального режима питания первичной обмотки трансформатора от источника постоянной ЭДС: а – зависимость $K_{ГУ}(t_1)$; б – формы кривых $u(t)$ и $i(t)$
 Fig.4. Obtaining the optimal power supply mode for the primary winding of the transformer from a source of constant EMF: a – dependence; b – curve shapes and

4. Амплитудная модуляция в инверторах

Применение амплитудной модуляции требует наличия разных уровней напряжений [12], которые принципиально можно получить за счет имеющегося в составе инвертора большой мощности силового трансформатора. Это позволяет без применения ШИМ создать многоуровневый инвертор с низким значением $K_{ГУ}$.

Из системы (1) видно, что для создания разных уровней $u_2(t)$, располагая только одним источником $u_1(t) = \pm U_{\pm}$, нужно изменять либо значения компонент R, L, M , либо значения производных

$\frac{di_i(t)}{dt}$. С технической точки зрения изменения режимных параметров [13] достигаются более простыми и экономичными средствами, чем изменения схемных параметров. Поэтому для получения на вторичных обмотках трансформатора необходимой величины $u_2(t)$ целесообразно изменять

$\frac{di_i(t)}{dt}$ и связанные с этим значения магнитных потоков Φ_i . Принимая прямую пропорцию между токами в обмотках и магнитным потоком $i(t) \propto \Phi(t)$, не создавая глубокого насыщения материала магнитопровода стержня [14], на котором расположены обмотки, и пренебрегая малыми величинами R_1, R_2 , будем считать

$$u_i(t) \approx \varepsilon_i(t) = W_i \frac{d\Phi_i}{dt}, \quad (9)$$

где W_i — число витков i -й секции [20].

У обычных трансформаторов все секции первичной обмотки, по кото-

рым протекает ток, участвуют в образовании единого магнитного потока Φ .

На рис. 5, а и рис. 5, б приведены примеры построения трехуровневых инверторов с $u_1(t) = -U_{\pm}$ пятью ступенями в кривой напряжения $u_2(t)$, причем на рис. 5, а инвертор построен на основе трансформатора, первичная обмотка которого секционирована и питается от источника E постоянной ЭДС. Секция W_{1A} создает магнитодвижущую силу F_{1A} , а секция W_{1B} — соответственно F_{1B} . С помощью ключей S_1-S_4 , образующих на базе СПП обычный мостовой инвертор, к первичной обмотке подводится напряжение $u_1(t)$, в котором путем одновременного замыкания ключей S_1 и S_4 либо S_2 и S_3 формируются нулевые ступени необходимой ширины (рис. 4, б).

В интервалах времени, когда ключи S_1-S_4 инвертора образуют ненулевые уровни напряжения $u_1(t) = +U_{\pm}$ или $-U_{\pm}$, оно уравновешено ЭДС первичной обмотки $\varepsilon_i(t)$. Следовательно, если в это время при помощи переключателя SA скачкообразно уменьшить суммарное количество витков обмотки с $W_{1A} + W_{1B}$ до W_{1A} , то скорость изменения потока Φ вырастет пропорционально отношению $(W_{1A} + W_{1B})/W_{1A}$ и вызовет увеличение ЭДС во вторичной обмотке W_2 (рис. 5, в). Так, в кривой выходного напряжения инвертора $u_2(t)$ будут созданы дополнительные ступени. Для минимизации $K_{ГУ}$ пятиступенчатых инверторов необходимо оптимизировать ширину ступеней их кривых $u(t)$ (рис. 5, в и рис. 5, з).

В соответствии с обозначениями на рис. 6, а действующее значение первой гармоники U_1 кривой напряжения $u(t)$ определится

$$U_1 = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(\omega t) dt = \frac{8}{\sqrt{2}T} \left(\int_0^{t_1} 2E \cos(\omega t) dt + \int_{t_1}^{t_2} E \cos(\omega t) dt \right) = \frac{4\sqrt{2}E (\sin(\omega t_1) + \sin(\omega t_2))}{\omega T}. \quad (10)$$

Действующее значение кривой напряжения $u(t)$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{4}{T} \left(\int_0^{t_1} (2E)^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} (E)^2 dt \right)} = 2E \sqrt{\frac{3t_1 + t_2}{T}}. \quad (11)$$

Отсюда действующее значение высших гармоник напряжений

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{4}{T} \left(\int_0^{t_1} (2E)^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} (E)^2 dt \right)} = 2E \sqrt{\frac{3t_1 + t_2}{T}}. \quad (12)$$

Таким образом, для пятиступенчатого однофазного инвертора напряжения величина $K_{\Gamma U}$ в общем случае определяется как

$$K_{\Gamma U} = \frac{\sqrt{\frac{3t_1 + t_2}{T} - \left(\frac{2\sqrt{2}}{\omega T} (\sin(\omega t_1) + \sin(\omega t_2)) \right)^2}}{\frac{2\sqrt{2}}{\omega T} (\sin(\omega t_1) + \sin(\omega t_2))}. \quad (13)$$

В выражении (13) присутствуют две независимые переменные t_1 и t_2 , причем по временным интервалам в соответствии с рис. 6, а должны соблюдаться ограничения

$$\begin{aligned} 0 \leq t_1 &\leq \pi/2, \\ t_1 &\leq t_2. \end{aligned} \quad (14)$$

Оптимизационную задачу вида $K_{\Gamma U} \rightarrow \min$ в данном случае следует решать, используя одновременно выражения (13) и (14) как общую систему [19].

Решение дает оптимальное значение для времени $t_1 \approx 0,2676\pi$ и $t_2 \approx 0,4286\pi$. Для однофазного инвертора напряжения с рабочей частотой $f = 50$ Гц и $T = 0,02$ с это означает, что ширина крайних ступеней, соответствующих уровням $\pm 2E$, должна иметь длительность $T_1 = T_5 \approx 0,00535$ с, ширина средних ступеней, соответствующих уровням $\pm E$, должна иметь длительность $T_2 \approx 0,00161$ с, а ширина нулевых ступеней должна составлять $T_3 \approx 0,00143$ с.

Таким образом, оптимальные длительности ступеней (рис. 6, а) пятиступенчатого инвертора промышленной частоты $f = 50$ Гц определяются как:

$$\begin{aligned} T_1 &\approx 0,00535 \text{ с}, \quad T_2 \approx 0,00161 \text{ с}, \\ T_3 &\approx 0,00143 \text{ с}. \end{aligned} \quad (15)$$

Уровень гармоник в кривой $u_2(t)$, полученной экспериментально (рис. 5, в), показан на рис. 6, б, где U_k — величина гармоники напряжения с порядковым номером k относительно первой гармоники. Снижение высших гармоник определено количественно как

$$K_{\Gamma U} \approx 16,2\%.$$

5. Совершенствование способа амплитудной модуляции магнитного потока

Коммутация от паек обмоток трансформаторов для изменения скорости изменения Φ и создания дополнительных ступеней в напряжении $u_2(t)$ вызывает нежелательные побочные коммутационные процессы. Так, в трансформаторе не весь магнитный поток, созданный обмотками, сцеплен с основным магнитным потоком Φ , и всегда имеются потоки рассеяния. На рис. 1, б они учтены расчетными индуктивностями рассеяния $L_1 - M$ и $L_2 - M$. Поэтому в моменты переключения SA на таких индуктивностях будет возникать ЭДС самоиндукции, вызывая

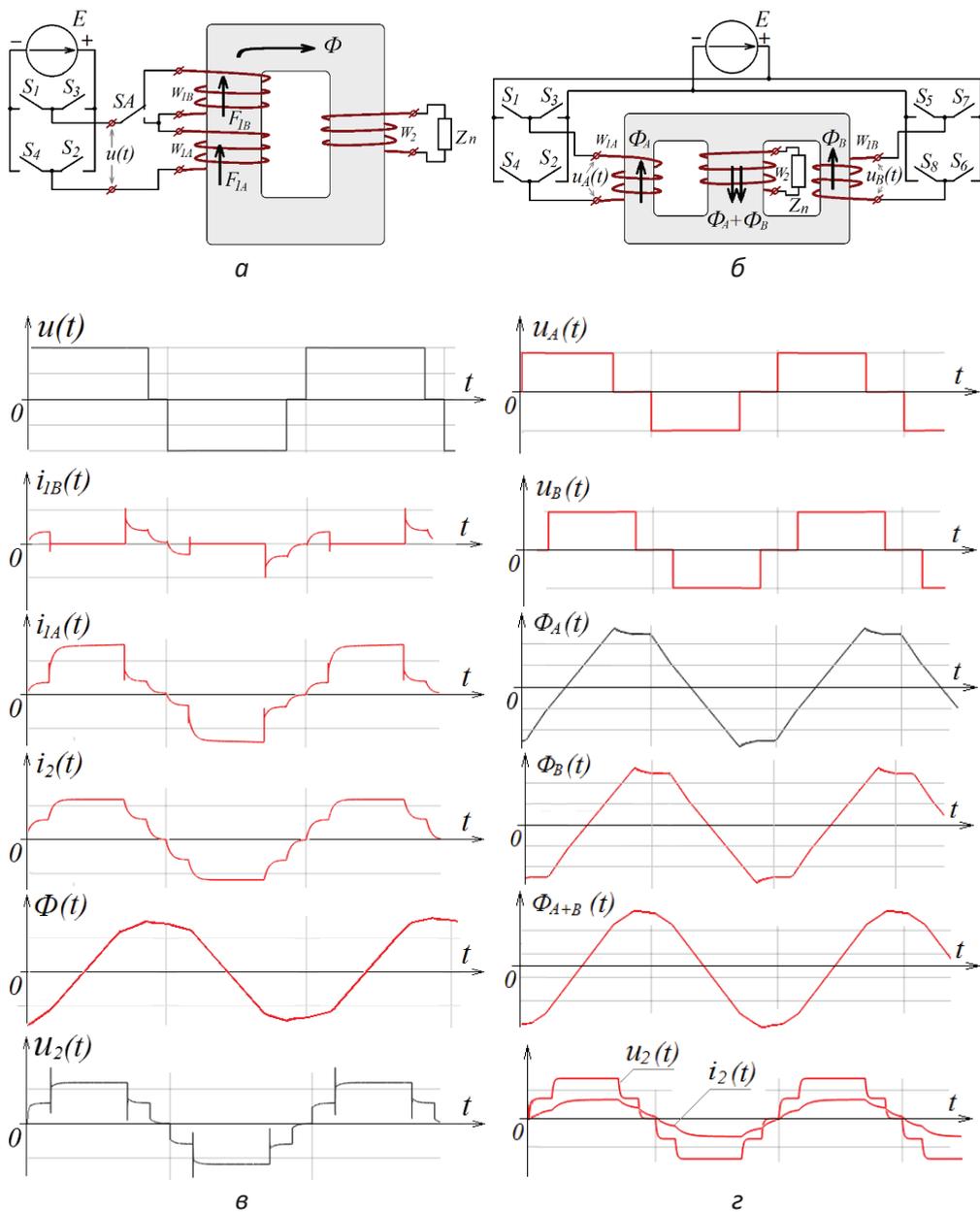


Рис.5. Пятиступенчатые инверторы: принципиальные схемы инвертора с коммутацией секций обмоток трансформатора (а) и магнитных потоков (б); кривые напряжений, токов и потоков инвертора с коммутацией секций обмоток трансформатора (в) и инвертора с коммутацией магнитных потоков (г)

Fig.5 Five-stage inverters: schematic diagrams of an inverter with switching of sections of transformer windings (a) and magnetic fluxes (b); curves of voltages, currents and flows of an inverter with switching of sections of transformer windings (c) and an inverter with switching of magnetic fluxes (d)

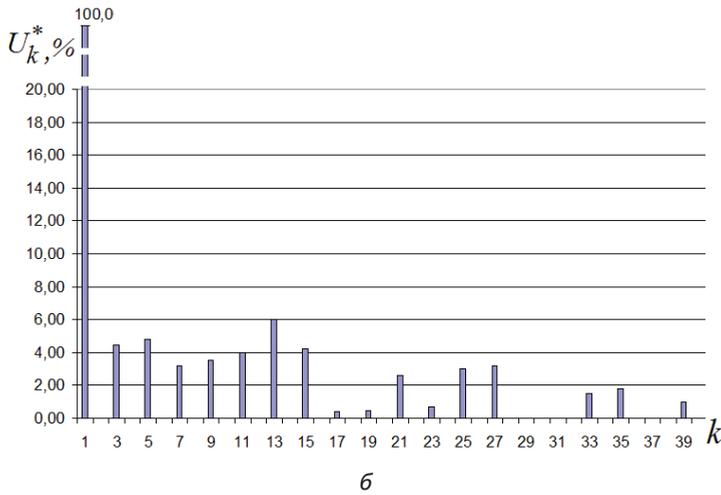
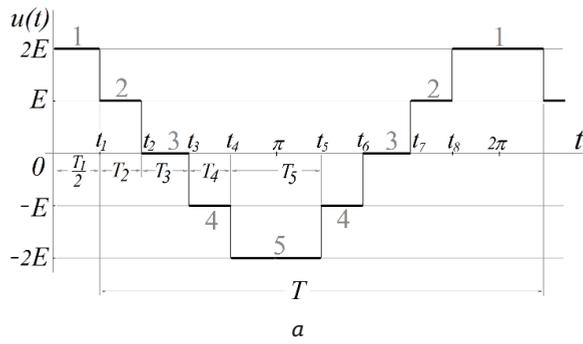


Рис. 6. Кривая выходного напряжения трехуровневого пятиступенчатого инвертора (а) и её гармонический состав (б)
 Fig. 6. Output voltage curve of a three-level five-stage inverter (a) and its harmonic composition (b)

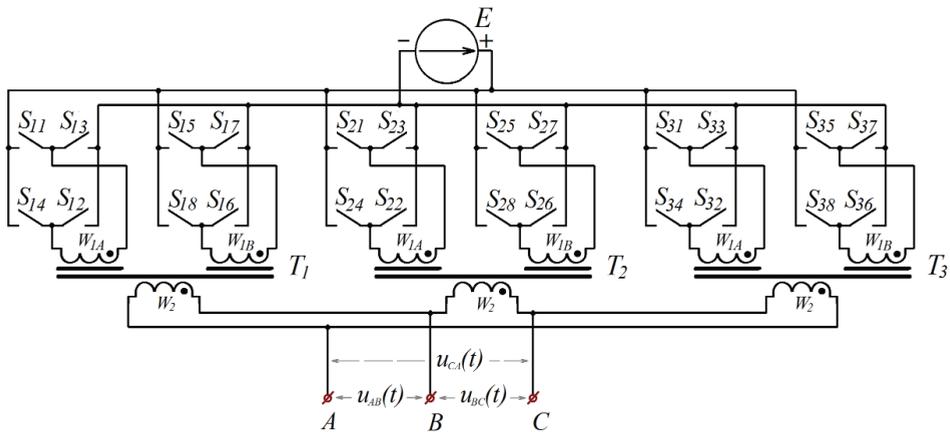


Рис.7. Электрическая схема трехуровневого пятиступенчатого инвертора напряжения трехфазного переменного тока
 Fig. 7. Electrical diagram of a three-level five-stage voltage inverter of a three-phase alternating current

перенапряжения, которые в ходе проведения численных экспериментов были зафиксированы в самой кривой $u_2(t)$ на рис. 5, в.

Поэтому с точки зрения ответственных потребителей переменного тока [15] следует исключить нежелательную коммутацию витков первичных или вторичных обмоток, а для сохранения амплитудной модуляции $u_2(t)$ необходим такой трансформатор, в котором изменение основного Φ происходит за счет сложения магнитных потоков Φ_i , созданных своими секциями обмоток W_i . Для этого магнитопровод трансформатора должен иметь разветвленные магнитные цепи.

Наиболее простой конструкцией обладает магнитопровод на основе трехстержневого трансформатора, который содержит две магнитные цепи (рис. 5, б). Первичная обмотка представлена самостоятельными секциями W_{1A} и W_{1B} , каждая из которых питается от своего мостового инвертора, построенного на базе ключей S_1-S_4 и S_5-S_8 . Ключи мостовых инверторов формируют напряжения $u_A(t)$ и $u_B(t)$, в которых также должны быть нулевые ступени. Для корректной работы необходимо, чтобы ширина ненулевых ступеней составляла $T_A = T_B \approx 0,00695$ с, а сами кривые $u_A(t)$ и $u_B(t)$ были взаимно сдвинуты на $\Delta t \approx 0,00161$ с. В этом случае при сложении образуемых ими магнитных потоков $\Phi_A + \Phi_B$ по выражению (9) вторичная обмотка W_2 сформирует напряжение $u_2(t)$ с пятью ступенями (рис. 5, г) определенной (15) ширины, которое приближается к синусоидальной форме с $K_{ГУ} \approx 16,2\%$.

Преимущество применения трансформатора с разветвленным магнитопроводом в составе инвертора напряжения заключается в возможности простой коммутации магнитных потоков, которая не вызывает перенапря-

жения при переходных процессах, как коммутация разветвленных электрических цепей в случае с двумя секциями обмоток обычного трансформатора.

Кроме того, разделение основного магнитного потока Φ на части позволяет равномерно и симметрично распределить токовую нагрузку между секциями обмоток W_{1A} и W_{1B} (рис. 5, в, г), что способствует снижению типовой мощности. Равномерным распределением нагрузки определяется как одинаковая плотность тока, так и равенство сечений проводников самих обмоток.

Дальнейшее улучшение формы кривой выходного напряжения инвертора большой мощности без применения ШИМ и введения дополнительных уровней возможно за счет исключения из гармонического состава (рис. 6, б) гармоник, кратных трём, которое сравнительно просто реализуется путем соединения вторичных обмоток трёх трансформаторов однофазных инверторов (рис. 5, б) в треугольник. Для создания полноценного инвертора трехфазного переменного тока (рис. 7) необходимо предусмотреть фазовые задержки в $2\pi/3$ на временных диаграммах коммутации ключей $S_{21}-S_{28}$ относительно $S_{11}-S_{18}$ и аналогичной задержки для ключей $S_{31}-S_{38}$ относительно $S_{21}-S_{28}$. В результате кривые $u_{AB}(t)$, $u_{BC}(t)$ и $u_{CA}(t)$ на выходе инвертора образуют симметричную трехфазную систему напряжений (рис. 8, а).

Исследование на моделях показало, что при взаимодействии высших гармоник трехуровневого инвертора, собранного по схеме, показанной на рис. 7, практически полностью устраняются гармоники, кратные трём (рис. 8, б), а число ступеней в выходных напряжениях возрастает с 5 до 9. Улучшение форм этих напряжений оценивается количественно как $K_{ГУ} \approx 8,92\%$.

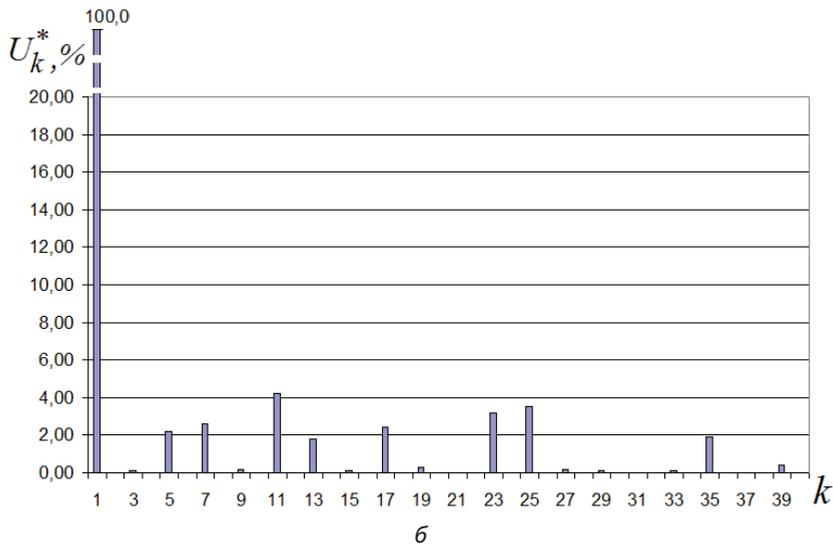
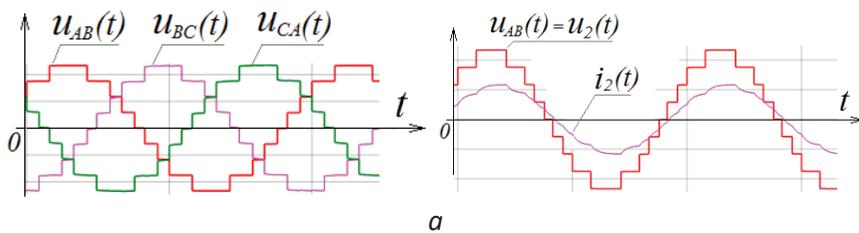


Рис. 8. Кривые линейных напряжений на выходе трехфазного инвертора (а) и их гармонический состав (б)

Fig. 8. Curves of linear voltages at the output of a three-phase inverter (a) and their harmonic composition (b)

Ряд характеристик, определяющих несинусоидальность напряжений полученного инвертора без применения ШИМ, уже соответствуют требованиям к показателям качества электрической энергии для сетей 0,38 кВ [3]. В частности, в требованиях отмечается, что значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, усредненное в интервале времени 10 мин, не должно превышать 12% в течение 100% времени интервала в одну неделю. Это удовлетворяется полученным показателем $K_{ГУ} \approx 8,92\%$.

Что касается влияния исследуемых инверторов на уровень несинусоидальности токов, то для автономной системы электроснабжения практиче-

ский интерес представляют, прежде всего, выходные токи инвертора $i_2(t)$ (рис. 8, а). Коэффициент гармоник этих токов $K_{Г1}$ во многом будет зависеть от характера самой нагрузки. Так, фильтрующий эффект нагрузки с типичным активно-индуктивным характером ($\cos\phi \approx 0,92$) при работе с данным инвертором создаст низкий уровень $K_{Г1} \approx 3,8\% \leq K_{ГУ} \approx 8,92\%$, который дополнительно будет способствовать приближению кривой $i_2(t)$ к синусоидальной форме.

Таким образом, объединение трех однофазных инверторов и соединение их вторичных обмоток в треугольник оправдано как с точки зрения получения эффективного средства для пода-

Таблица

Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения, %
 The values of the coefficients of the harmonic components of the voltage, %

Номер гармоники, k	Получено экспериментально	Установлено требованиями стандарта	Итог
5	2,2	6	допустимо
7	2,6	5	допустимо
11	4,1	3,5	превышает
13	1,8	3,0	допустимо
17	2,4	2,0	превышает
23	3,2	1,5	превышает
25	3,4	1,5	превышает
35	1,8	1,5	превышает

вления части высших гармоник, так и с точки зрения создания источника бесперебойного питания в трехфазном исполнении. Такой источник необходим для надежной работы объектов промышленной инфраструктуры горных выработок, шахт и рудников, которые в значительной части представляют собой потребителей электрической энергии трехфазного переменного тока.

Однако следует заметить, что при этом часть коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения всё ещё превышает установленные в [3] значения (таблица).

Поэтому для доведения всех значенных показателей качества электрической энергии, определяющих несинусоидальность напряжений на выходе инвертора, до необходимых требований, которые установлены стандартом, целесообразно также предусмотреть простые фильтровые устройства [16, 17], выбор и расчет которых является предметом отдельного исследования.

Выводы

1. Показано, что приближение формы кривых напряжений инверторов к синусоиде можно реализовать не только за счет модуляции ширины отдельных импульсов, но и за счет

модуляции амплитуды этих импульсов. Выведены аналитические выражения, определяющие коэффициенты гармоник напряжений на выходе однофазных автономных инверторов, не использующих ШИМ и фильтровые устройства.

2. Исследована амплитудная модуляция магнитных потоков в разветвленных магнитопроводах силовых трансформаторов для получения на выходе инвертора напряжения переменного тока со ступенчатой формой кривой модифицированного синуса. Преимущество амплитудной модуляции магнитных потоков заключается в достижении равномерной загрузки секций обмоток и отсутствии перенапряжений в них во время работы инвертора, что подтверждено экспериментальными результатами.

3. Сформулирована и решена оптимизационная задача минимизации коэффициентов гармоник выходных напряжений для однофазных автономных инверторов. Решение этой задачи определяет оптимальную ширину каждой ступени кривой выходного напряжения. Так, для инвертора с тремя ступенями ширина нулевых ступеней должна составлять $\approx 0,258\pi$, а ширина остальных ступеней должна быть $\approx 0,742\pi$. При этих условиях уровень

высших гармоник в выходном напряжении минимален и характеризуется коэффициентом $K_{ГУ} \approx 29,5\%$.

4. Предложено схемное решение однофазного инвертора напряжения переменного тока промышленной частоты 50 Гц на основе трехстержневого трансформатора с амплитудной модуляцией магнитных потоков. Для достижения минимума высших гармоник в выходном напряжении на уровне $K_{ГУ} \approx 16,2\%$ определены режимы раздельной работы двух секций первичных обмоток, которые заключаются во взаимном смещении циклов их коммутации на величину временного интервала $\approx 0,00161$ с, причем питание каждой секции в одном полупериоде должно занимать время $\approx 0,00695$ с.

5. Исследована эффективность объединения трех однофазных инверторов напряжения переменного тока на основе трехстержневого трансфор-

матора с амплитудной модуляцией магнитных потоков и соединением вторичных обмоток в треугольник для создания источника бесперебойного питания в трехфазном исполнении с подавлением гармоник, кратных трём в выходных напряжениях переменного тока. Установлено, что такое решение дополнительно снижает уровень высших гармоник до значения $K_{ГУ} \approx 8,92\%$, что даже без использования фильтровых устройств, которые предусмотрены в подобных преобразователях, приближает показатели качества электрической энергии к требованиям, изложенным в существующем стандарте. Ценность применения такого источника определяется перспективой создания надежной системы электроснабжения, что особенно актуально для удаленных объектов промышленной инфраструктуры горных выработок, шахт и рудников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстрицкий Г. Ф. Установки автономного и резервного электроснабжения // Промышленная энергетика. 2008, № 2. — С.13–23.

2. Абрамович Б. Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. — С. 31–40.

3. Казанов М. С. Разработка алгоритма оптимизации параметров и комплексной оценки эффекта внедрения локальных источников питания в системах электроснабжения потребителей с распределенной генерацией: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.09.03 // Москва, 2017. 20 с.

4. Колесников С. В., Леонов А. П. Надежность изоляции статорных обмоток частотно-управляемых электродвигателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022, №1. т. 18. — С. 33–62. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-33-62.

5. Дудкин А. Н., Леонов А. П., Супуева А. С. Влияние дефектов в межвитковой изоляции на ее стойкость к эксплуатационным нагрузкам, характерным для энергоэффективных способов управления электротехническим оборудованием. Томск: Известия ТПУ, 2015. Т. 326, № 11. — С. 83–89.

6. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes / Energy Conversion and Management. — 2011.–Vol. 52. — P.1114–1128.

7. Singh B., Mittal N., Verma K. S. Multi-level inverter: a literature survey on topologies and control strategies // International Journal of Reviews in Computing. — 2012, Vol. 10. — P. 1–16.

8. Panagis P., Stergiopoulos F., Marabeas P. Comparison of State of the Art Multilevel Inverters / Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE Conference Publications. — P. 4296–4301.

9. Евдокимов С. А., Щуров Н. И. Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей: монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. — 423 с.

10. Ивакин В. Н., Ковалев В. Д., Магницкий А. А. Нормирование энергоэффективности распределительных трансформаторов // Энергия единой сети. — 2017. — №5 (34). С. 20 — 31.

11. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. — СПб.: Изд-во «Лань», 2008. — 544 с.

12. Виноградов А. Б., Коротков А. А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты: монография. — Иваново: Изд-во Ивановский государственный энергетический университет, 2018. — 184 с.

13. Коверникова Л. И., Серков А. В., Шамонов Р. Г. Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем // Региональная энергетика: безопасность и эффективность. 2018. №1. — С. 75–85.

14. Зирка С. Е., Мороз Ю. И., Мороз Е. Ю., Тарчуткин А. Л. Топологические модели трансформатора // Электричество, 2012. № 10. — С. 33–42.

15. Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А. Методы и средства обеспечения энергетической безопасности промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом // Промышленная энергетика, 2016. № 9. — С. 18–22.

16. Боярская Н. П., Довгун В. П., Егоров Д. Э. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: монография. — Красноярск: СФУ, 2014. — 192 с.

17. Лютаревич А. Г., Лейнерт В. В., Соколов Д. С. Анализ методов контроля качества электроэнергии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2019. — № 12–1. — С. 126–130.

18. Rahmani-Andebili M. Problems: Sinusoidal Steady-State Analysis. In: AC Electrical Circuit Analysis . Springer, Cham. 2021. — P. 1– 36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60986-3_1.

19. Batunlu C., Albarbar A., Strategy for enhancing reliability and lifetime of DC-AC inverters used for wind turbines / Microelectronics Reliability — 2018. ID 6945509. — P. 13.

20. Avinash Aithal, Gen Li, Jianzhong Wu, James Yu, Performance of an electrical distribution network with Soft Open Point during a grid side AC fault / Applied Energy. — 2018. ID 8953447. — P. 11. **ТАБ**

REFERENCES

1. Bystritsky G. F. Autonomous and backup power supply installations. *Industrial Energy*. 2008. no. 2. pp.13–23. [In Russ].

2. Abramovich B. N. The system of uninterrupted power supply of mining enterprises. *Notes of the Mining Institute*. 2018. V. 229. pp. 31–40. [In Russ].

3. Kazanov M. S. Development of an algorithm for optimizing parameters and a comprehensive assessment of the effect of introducing local power sources in power supply systems for consumers with distributed generation: Abstract of the thesis. ... cand. tech. Sciences: 05.09.03. Moscow, 2017. 20 p. [In Russ].

4. Kolesnikov S. V., Leonov A. P. Reliability of isolation of stator windings of frequency-controlled electric motors. *Electrotechnical and information complexes and systems*. 2022, no. 1, v. 18. pp. 33–62. [In Russ].
5. Dudkin A. N., Leonov A. P., Supueva A. S. Influence of defects in inter-turn insulation on its resistance to operational loads typical for energy-efficient methods of controlling electrical equipment. *Tomsk: Izvestiya TPU*, 2015. V. 326, no. 11. pp. 83–89. [In Russ].
6. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. pp. 1114–1128.
7. Singh B., Mittal N., Verma K. S. Multi-level inverter: a literature survey on topologies and control strategies. *International Journal of Reviews in Computing*. 2012, Vol. 10. pp. 1–16.
8. Panagis P., Stergiopoulos F., Marabeas P. Comparison of State of the Art Multilevel Inverters. *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE Conference Publications*. pp. 4296–4301.
9. Evdokimov S. A., Shchurov N. I.. Structural synthesis of multiphase valve converters: monograph. Novosibirsk: Publishing house of NGTU, 2010. 423 p. [In Russ].
10. Ivakin V. N., Kovalev V. D., Magnitsky A. A. Rationing of energy efficiency of distribution transformers. *Energy of a single network*. 2017. no. 5 (34). pp. 20–31. [In Russ].
11. Beletsky A. F. Theory of linear electrical circuits. St. Petersburg: Publishing house “Lan”, 2008. 544 p. [In Russ].
12. Vinogradov A. B., Korotkov A. A. Control algorithms for a high-voltage multilevel frequency converter: monograph. Ivanovo: Publishing House of Ivanovo State Power Engineering University, 2018. 184 p. [In Russ].
13. Kovernikova L. I., Serkov A. V., Shamonov R. G. On the management of the quality of electric energy in Russia in the past, present and future. *Regional Energy: Safety and Efficiency*. 2018. no. 1. pp. 75–85. [In Russ].
14. Zirka S. E., Moroz Yu. I., Moroz E. Yu., Tarchutkin A. L. Topological models of a transformer. *Electricity*, 2012. no. 10. pp. 33–42. [In Russ].
15. Abramovich B. N., Sychev Yu. A. Methods and means of ensuring the energy security of industrial enterprises with a continuous technological cycle. *Industrial Energy*, 2016. no. 9. pp. 18–22. [In Russ].
16. Boyarskaya N. P., Dovgun V. P., Egorov D. E. Synthesis of filter-compensating devices for power supply systems: monograph. Krasnoyarsk: SFU, 2014. 192 p. [In Russ].
17. Lutarevich A. G., Leinert V. V., Sokolov D. S. Analysis of power quality control methods. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019. no. 12–1. pp. 126–130. [In Russ].
18. Rahmani-Andebili M. Problems: Sinusoidal Steady-State Analysis. In: *AC Electrical Circuit Analysis*. Springer, Cham. 2021. pp. 1–36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60986-3_1.
19. Batunlu C., Albarbar A., Strategy for enhancing reliability and lifetime of DC-AC inverters used for wind turbines. *Microelectronics Reliability* 2018. ID 6945509. P. 13.
20. Avinash Aithal, Gen Li, Jianzhong Wu, James Yu, Performance of an electrical distribution network with Soft Open Point during a grid side AC fault. *Applied Energy*. 2018. ID 8953447. P. 11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мятеж Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнических комплексов» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ-НЭТИ),

Лисицын Павел Сергеевич — ассистент кафедры «Электротехнических комплексов» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ-НЭТИ), магистр.

Конфликт интересов авторов отсутствует.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Myatezh S. V., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University (NSTU-NETI);

Lisitsyn P. S., assistant of the department of “Electrotechnical complexes” of the Novosibirsk State Technical University (NSTU-NETI), master.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 04.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 04.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

