

ВЛИЯНИЕ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ И УГЛОВ ИХ ВКЛЮЧЕНИЯ В МНОГОУРОВНЕВОМ ИНВЕРТОРЕ НА СТРУКТУРУ СПЕКТРА ЕГО ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, А.Ю. Мирошниченко
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия

В настоящее время широкое распространение в электроэнергетических системах различного назначения получают многоуровневые инверторы напряжения, являясь эффективным методом формирования гармонического состава выходного напряжения. Реализация многоуровневой концепции позволяет управлять составом и величиной гармоник на их выходе, что является актуальным для систем электропитания технологических процессов, качество которых зависит от спектра питающего напряжения. Предложен подход к определению влияния изменения параметров в многоуровневом инверторе на спектр его выходного напряжения, обеспечивающий возможность решать задачу синтеза многоуровневой кривой с желаемым гармоническим составом. Получены формулы для расчета чувствительности коэффициентов гармонических составляющих напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения к изменению уровней входного напряжения и электрических углов их включения в инверторе. Разработан алгоритм синтеза многоуровневой кривой выходного напряжения с задаваемым гармоническим составом, наиболее соответствующим реализуемому технологическому процессу. Результаты компьютерного моделирования синтеза многоуровневой кривой с желаемым гармоническим составом за счет изменения напряжений уровней при различных величинах выбранных гармоник показывают его универсальность, наглядность и информативность. Представленный подход к проектированию рассматриваемого класса преобразовательных устройств заметно расширяет функциональные возможности многоуровневых инверторов напряжения, что способствует росту их применения в современных промышленных технологиях, качество которых в значительной степени определяется спектром питающего напряжения, например, в системах многочастотного индукционного нагрева.

Ключевые слова: многоуровневый инвертор напряжения, коэффициент гармонических составляющих напряжения, уровень напряжения, угол включения уровня, градиент, чувствительность.

Введение

В настоящее время все большее распространение в области управления параметрами электрической энергии и ее потребления получают многоуровневые инверторы напряжения (МИН). При этом они являются эффективным инструментом формирования гармонического состава выходного напряжения по сравнению с традиционными двухуровневыми преобразовательными схемами [1–3]. Реализация многоуровневой концепции позволяет управлять составом и величиной гармоник на выходе МИН, используемых для электроснабжения технологических процессов, качество которых зависит от спектра питающего напряжения. Особую значимость рассматриваемый класс преобразовательных устройств приобретает в связи с бурным развитием распределенных систем интеллектуальной электроэнергетики [4, 5].

Гармонический состав выходной кривой МИН при заданном числе уровней напряжения зависит от параметров многоуровневой кривой, а именно от их величин и электрических углов переключения. Поэтому первоначально значитель-

ное число работ по теории и практике МИН было посвящено нахождению для инверторов с различным числом уровней сочетаний величин уровней и углов их переключений, оптимальных с точки зрения приближения формы выходной кривой к синусоиде [6]. В соответствии с существующими требованиями [7] это сводится к минимизации таких показателей качества выходной кривой, как суммарный коэффициент гармоник K_U и отдельные гармонические составляющие $K_{U(n)}$.

Однако кроме задачи нахождения оптимальных параметров кривой практическое значение имеет проблема их реализации в силовой схеме инвертора. В частности, целесообразно поставить вопрос, какова чувствительность значений показателей качества выходной кривой к точности реализации ее параметров. Актуальность этой проблемы следует из того факта, что в отличие от традиционных инверторов напряжения в МИН стабилизации и регулированию подлежит не одно напряжение источника питания, а несколько напряжений уровней.

С ответом на этот вопрос связана более общая задача синтеза многоуровневой кривой с заданным

управляемым гармоническим составом, решение которой позволит значительно расширить применение промышленных технологий, качество которых в значительной степени определяется спектром питающего напряжения.

Решение этой задачи важно при синтезе многочастотных преобразователей, которые активно применяются в индукционном нагреве, например, при термообработке деталей сложной формы, обеспечивающей равномерный их нагрев по сечению. Кроме того, двухчастотный нагрев применяется при индукционной плавке металлов, при котором необходимо перемешивание с помощью электромагнитного поля расплава для получения его однородных химических свойств. При этом оптимальные значения частот тока индуктора, требуемые для эффективного нагрева и эффективного перемешивания, значительно отличаются [8].

В литературе основное внимание уделяется синтезу двухчастотных преобразователей на основе одного инвертора и двухчастотного резонансного контура, а также построенные по принципу сложения выходных параметров двух автономных инверторов, работающих на разных частотах, и с использованием многофункционального трансформатора [8–11]. Однако они имеют невысокие энергетические и большие массогабаритные показатели. Тем более применяемые принципы их построения нецелесообразны при синтезе инверторов с числом гармоник, больше двух.

Для получения многочастотного источника также могут быть применены модульные преобразовательные системы, состоящие из нескольких инверторов на базе IGBT-модулей с управлением на основе широтно-импульсной модуляции. В этом случае помимо заметного усложнения системы управления существует проблема объединения отдельных модулей с применением высокочастотных трансформаторов, предназначенных для согласования нагрузки и гальванической развязки источников высокочастотного питания.

В связи с этим наиболее перспективным подходом к синтезу многочастотных источников представляется применение многоуровневых инверторов.

Ниже приводятся теория и методика, позволяющие осуществить подобный синтез.

Методика исследования

Для решения поставленной задачи воспользуемся методикой анализа выходных кривых многоуровневых инверторов, предложенной в [12].

Суть ее рассмотрим на примере многоуровневой кривой $u(\theta)$, период которой показан на рис. 1.

Исследованию подлежит влияние параметров кривой, а именно значений уровней напряжения λ_k ($k = \overline{1, 24}$) и углов их включения θ_k ($k = \overline{2, 24}$), на ее показатели качества, т. е. гармонические составляющие напряжения $K_{U(n)}$ и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений K_U .

В случае равноотстающих углов включения

$$\theta_k = (k - 1) \frac{\pi}{12}$$

и величинах уровней напряжения, определяемых по формуле

$$\lambda_k = \sin\left(\frac{\theta_k + \theta_{k+1}}{2}\right), \quad (k = \overline{1, 24}),$$

мы имели бы шестиуровневую кривую, для которой только шесть первых уровней являются независимыми, так как

$$\lambda_{13-i} = \lambda_i, \quad i = \overline{1, 6};$$

$$\lambda_{j+12} = -\lambda_j, \quad j = \overline{1, 12}.$$

В дальнейшем, однако, будут использоваться все 24 значения напряжений уровней и углов включения этих уровней, поскольку в данной работе проводится исследование влияния всех параметров кривой на показатели качества выходного напряжения.

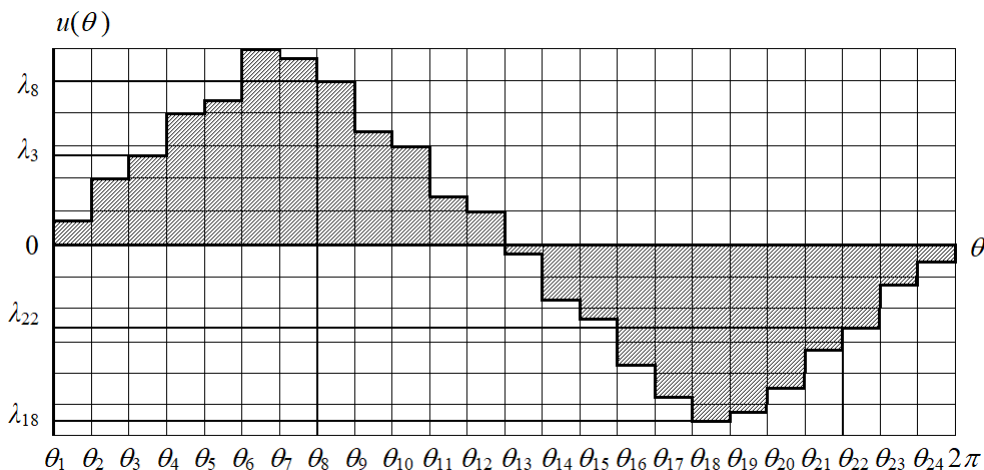


Рис. 1. Кривая $u(\theta)$ выходного напряжения МИИ

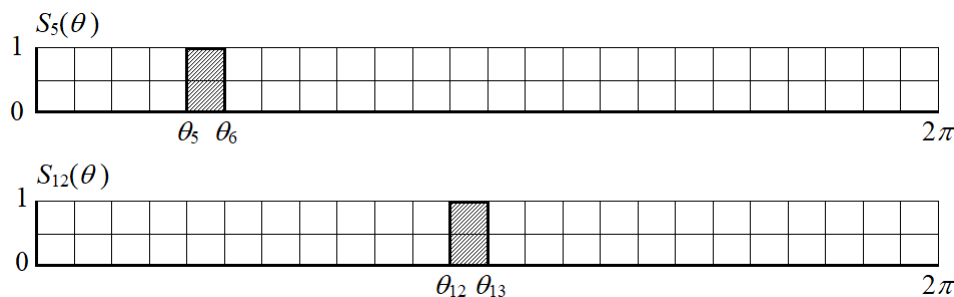


Рис. 2. Графики носителя $S_5(\theta)$ уровня λ_5 и носителя $S_{12}(\theta)$ уровня λ_{12}

Определим следующие вспомогательные функции на периоде $[0, 2\pi]$:

$$S_k(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \theta_k \leq \theta < \theta_{k+1}, \quad k = \overline{1, 24}; \\ 0 & \text{для других значений } \theta. \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 2 приведены графики двух таких функций $S_5(\theta)$ и $S_{12}(\theta)$. Функции $S_k(\theta)$ можно назвать носителями соответствующих уровней [5], так как они равны 1 в те и только те моменты, в которые выходная кривая равна λ_k , и нулю в моменты, когда кривая принимает другие значения.

С помощью носителя $S_k(\theta)$ многоуровневую кривую $u(\theta)$ можно представить следующим образом:

$$u(\theta) = \sum_{k=1}^{24} \lambda_k \cdot S_k(\theta). \quad (2)$$

Разложим носитель $S_k(\theta)$ в ряд Фурье

$$S_k(\theta) = b_{k,(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{k,(n)} \cdot \sin(n\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} b_{k,(n)} \cdot \cos(n\theta), \quad (3)$$

где

$$b_{k,(0)} = (\theta_{k+1} - \theta_k) / 2\pi; \\ a_{k,(n)} = (\cos(n\theta_k) - \cos(n\theta_{k+1})) / n\pi; \quad (k = \overline{1, 24}) \quad (4) \\ b_{k,(n)} = (\sin(n\theta_{k+1}) - \sin(n\theta_k)) / n\pi.$$

Из формул (2)–(4) следует, что многоуровневая кривая $u(\theta)$ может быть представлена в виде следующего ряда Фурье

$$u(\theta) = v_{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} u_{(n)} \cdot \sin(n\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} v_{(n)} \cdot \cos(n\theta), \quad (5)$$

где коэффициенты имеют вид

$$v_{(0)} = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{24} \lambda_k \cdot (\theta_{k+1} - \theta_k); \\ u_{(n)} = \sum_{k=1}^{24} \lambda_k \cdot a_{k,(n)}; \quad (6) \\ v_{(n)} = \sum_{k=1}^{24} \lambda_k \cdot b_{k,(n)}.$$

С помощью приведенных выше формул оказывается возможным исследование чувствительности показателей качества выходного напряжения МИН к отклонениям величин его параметров от оптимальных значений.

Чувствительность показателей качества кривой напряжения к погрешностям реализации ее параметров

Понятие чувствительности введено в теории автоматического управления для оценки изменения параметров системы от их номинальных значений на показатели качества ее функционирования [13]. В частности, известна формула коэффициентов чувствительности с использованием логарифмической производной

$$\Xi_x^y = \frac{d \ln(y)}{d \ln(x)} = \frac{dy/y_0}{dx/x_0} = \frac{y'(x) \cdot x_0}{y_0}.$$

Здесь y – некоторый показатель качества функционирования системы; x – влияющий на его значение параметр; y_0 и x_0 – их номинальные значения; Ξ_x^y – чувствительность показателя y к отклонению параметра x от номинального значения. Преимущество этой формулы заключается в том, что она сравнивает не сами отклонения dx и dy , а их относительные значения dx/x_0 и dy/y_0 . Это возможно только в том случае, если номинальные значения y_0 и x_0 отличны от нуля. В нашем случае показателями качества являются гармонические составляющие $K_{U(n)}$. Поскольку для некоторых из них оптимальные значения для многоуровневой кривой равны нулю, то приведенная форма оказывается неприменимой.

В связи с этим в качестве коэффициентов чувствительности в данной работе будем использовать не логарифмическую, а обычную частную производную. Практическое значение нахождения коэффициентов чувствительности состоит в следующем. Пусть y – некоторый показатель качества кривой выходного напряжения, а y_m – его максимально допустимое значение, y_0 и $\partial y / \partial x$ – оптимальное значение и частная производная показателя y по параметру x , рассчитанные при оптимальных значениях всех параметров. В этом слу-

чае максимально допустимое отклонение Δx параметра x от его оптимального значения можно найти по приближенной формуле

$$\Delta x \cong (y_m - y) \left/ \frac{\partial y}{\partial x} \right. \quad (7)$$

Таким образом, для оценки допустимых отклонений параметров многоуровневой кривой необходимо иметь значения частных производных суммарного коэффициента гармоник K_U и всех значимых гармонических составляющих $K_{U(n)}$ по всем параметрам λ_k и θ_k $k = \overline{1, 24}$.

Формулы (2), (5)–(6) позволяют рассчитать производные амплитуд гармоник по всем уровням и углам их включения $\{\theta_j^0\}$. Поскольку коэффициенты K_U и $K_{U(n)}$ являются функциями этих величин, то ниже мы получим аналитические выражения для их частных производных по всем уровням и углам их включения для применения формулы (7).

Производные коэффициентов Фурье $u_{(n)}$ и $v_{(n)}$ кривой (2) по величинам уровней напряжения λ_k имеют вид

$$\frac{\partial u_{(n)}}{\partial \lambda_k} = a_{k,(n)}; \quad \frac{\partial v_{(n)}}{\partial \lambda_k} = b_{k,(n)} \quad (n > 0, k = \overline{1, 24}). \quad (8)$$

Для постоянной составляющей получим следующее выражение

$$\frac{\partial v_{(0)}}{\partial \lambda_k} = \frac{1}{2\pi} (\theta_{k+1} - \theta_k).$$

Полная гармоника $w_{(n)}$ равна

$$w_{(n)} = \sqrt{u_{(n)}^2 + v_{(n)}^2} \quad (9)$$

и поэтому

$$\frac{\partial w_{(n)}}{\partial \lambda_k} = \sum_{j=1}^{24} (a_{j,(n)} a_{k,(n)} + b_{j,(n)} b_{k,(n)}) \left/ w_{(n)} \right. \quad (10)$$

Далее найдем производные от коэффициентов $a_{k,(n)}$ и $b_{k,(n)}$ по углам коммутации θ_k .

Из формулы (7) следует, что при данном k коэффициенты $a_{k,(n)}$ и $b_{k,(n)}$ зависят только от углов θ_k и θ_{k+1} , и значит, производные от этих функций по другим углам равны нулю. Для отличных от нуля производных получим следующие выражения:

$$\frac{\partial v_{(0)}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{2\pi} (\lambda_{k-1} - \lambda_k); \quad (11)$$

$$\frac{\partial a_{k,(n)}}{\partial \theta_k} = -\frac{1}{\pi} \sin(n\theta_k); \quad (12)$$

$$\frac{\partial a_{k,(n)}}{\partial \theta_{k+1}} = \frac{1}{\pi} \sin(n\theta_{k+1}); \quad (13)$$

$$\frac{\partial b_{k,(n)}}{\partial \theta_k} = -\frac{1}{\pi} \cos(n\theta_k); \quad (14)$$

$$\frac{\partial b_{k,(n)}}{\partial \theta_{k+1}} = \frac{1}{\pi} \cos(n\theta_{k+1}). \quad (15)$$

Здесь $k > 1$ и $k < 25$, так как углы θ_1 и θ_{25} имеют фиксированные значения 0 и 2π соответственно.

Найдем производные от коэффициентов разложения в ряд Фурье $u_{(n)}$ и $v_{(n)}$ многоуровневой кривой $u(\theta)$ по углам θ_k .

Исходя из формул (12)–(15), можно сделать вывод, что при дифференцировании формул (6) по углам коммутации θ_k в результирующей сумме окажутся только два слагаемых, отличных от нуля:

$$\frac{\partial u_{(n)}}{\partial \theta_k} = \frac{\partial a_{k-1,(n)}}{\partial \theta_k} \lambda_{k-1} + \frac{\partial a_{k,(n)}}{\partial \theta_k} \lambda_k. \quad (16)$$

Учитывая формулы (12) и (13), получим

$$\frac{\partial u_{(n)}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{\pi} (\lambda_{k-1} - \lambda_k) \sin(n\theta_k). \quad (17)$$

Аналогичным образом с учетом формул (14) и (15) находим

$$\frac{\partial v_{(n)}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{\pi} (\lambda_{k-1} - \lambda_k) \cos(n\theta_k). \quad (18)$$

В формулах (16)–(18) параметр k изменяется в пределах от 2 до 24.

Найдем производные от результирующей гармоники $w_{(n)}$ по углам коммутации θ_k , используя формулы (17) и (18):

$$\frac{\partial w_{(n)}}{\partial \theta_k} = \left(\frac{\partial u_{(n)}}{\partial \theta_k} u_{(n)} + \frac{\partial v_{(n)}}{\partial \theta_k} v_{(n)} \right) \left/ w_{(n)} \right.$$

Введем угол α_n , равный

$$\alpha_n = \arctg \frac{v_{(n)}}{u_{(n)}}.$$

Затем, применяя формулы (17) и (18), получим

$$\frac{\partial w_{(n)}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{\pi} (\lambda_{k-1} - \lambda_k) \sin(n\theta_k + \alpha_n). \quad (19)$$

Рассчитав значения производных и по формулам (10) и (19) соответственно, можно найти производные от коэффициента гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U по величинам уровней λ_k и углам коммутации θ_k . Эти коэффициенты определяются следующими формулами:

$$K_{U(n)} = \frac{w_n}{w_1}; \quad (20)$$

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^N w_j^2}}{w_1}. \quad (21)$$

В последней формуле в соответствии с требованиями [7] следует принять $N = 40$.

С учетом формул (20) и (21) получаем производные $\frac{\partial K_{U(n)}}{\partial \lambda_k}$, $\frac{\partial K_{U(n)}}{\partial \theta_k}$ и $\frac{\partial K_U}{\partial \theta_k}$, $\frac{\partial K_U}{\partial \lambda_k}$:

$$\frac{\partial K_{U(n)}}{\partial \lambda_k} = \frac{\frac{\partial w_{(n)}}{\partial \lambda_j} w_{(1)} - \frac{\partial w_{(1)}}{\partial \lambda_j} w_{(n)}}{w_{(1)}^2}; \quad (22)$$

$$\frac{\partial K_{U(n)}}{\partial \theta_k} = \frac{\frac{\partial w_{(n)}}{\partial \theta_j} w_{(1)} - \frac{\partial w_{(1)}}{\partial \theta_j} w_{(n)}}{w_{(1)}^2};$$

$$\frac{\partial K_U}{\partial \theta_k} = \frac{\sum_{j=2}^n w_j \cdot \frac{\partial w_j}{\partial \theta_k} - K_U^2 \cdot \frac{\partial w_1}{\partial \theta_k} \cdot w_1}{\sum_{j=2}^n w_j^2}; \quad (23)$$

$$\frac{\partial K_U}{\partial \lambda_k} = \frac{\sum_{j=2}^n w_j \cdot \frac{\partial w_j}{\partial \lambda_k} - K_U^2 \cdot \frac{\partial w_1}{\partial \lambda_k} \cdot w_1}{\sum_{j=2}^n w_j^2}.$$

Синтез многоуровневой кривой с желаемым гармоническим составом за счет изменения напряжений уровней

Формулы (22) и (23) для расчёта чувствительности показателей качества K_U и $K_{U(n)}$ к изменению параметров λ_k и θ_k дают возможность решать задачу синтеза многоуровневой кривой с желаемым гармоническим составом, поставленную в начале статьи. Число уровней M считаем фиксированным, так что ниже индекс k у параметров λ_k и θ_k меняется от 1 до M . В связи с особенностью решаемой задачи понятие числа уровней здесь отличается от общепринятого. Так, на рис. 1 число уровней равно 24.

Ограничимся изменением только величин напряжений уровней, считая углы их включения фиксированными. Для определенности будем считать их равноудаленными, т. е. положим

$$\theta_k = (k - 1) \frac{2\pi}{M}, \quad k = \overline{1, M}.$$

Требуемые напряжения уровней, рекомендуемые в синтезируемых вариантах кривых, могут быть реализованы при использовании в схемах преобразователей универсального источника пи-

тания многоуровневого инвертора, предложенного в [14]. Структурная схема преобразователя на основе такого источника напряжений уровней показана на рис. 3.

Способ функционирования рассмотрим на примере четырехуровневого преобразователя, положительный полупериод кривой выходного напряжения которого показан на рис. 4.

Формирование входного напряжения инвертора происходит на каждом полупериоде $(0, T/2)$ попеременно ИППН₁ и ИППН₂, способными воспринимать обратный ток инвертора при резистивно-индуктивном характере нагрузки. Коммутатор подает напряжение u_1 с выхода ИППН₁ на вход инвертора в интервалы времени $(0, t_1], (t_2, t_3], (t_4, t_5], (t_6, t_7]$, обеспечивая последовательные уровни U_1, U_3, U_3, U_1 , и напряжение u_2 с выхода ИППН₂ на вход инвертора в интервалы $(t_1, t_2], (t_3, t_4], (t_5, t_6]$, обеспечивающие уровни U_2, U_4, U_2 .

В подготовительные интервалы времени, в которые ИППН отключены от входа инвертора, они изменяют напряжение на своих выходах в соответствии с кривыми u_1 и u_2 рис. 4. Для ИППН₁ это интервалы $(t_1, t_2], (t_3, t_4], (t_5, t_6]$, а для ИППН₂ это интервалы времени $(0, t_1], (t_2, t_3], (t_4, t_5], (t_6, t_7]$. Затененные участки графиков соответствуют рабочим интервалам, в которые соответствующие ИППН подключены к входу инвертора. Пунктирные линии обозначают переходные процессы изменения выходных напряжений ИППН в подготовительные промежутки времени.

На рис. 5 показан упрощенный вариант реализации силовой схемы, соответствующей структурной схеме рис. 3.

На рис. 5 через V обозначены полностью управляемые ключи, проводящие ток в направлении, указанном стрелками. Пунктиром выделены модули, соответствующие изображенному на рис. 3.

Напряжения u_1 и u_2 формируются на конденсаторах C_1 и C_2 соответствующих ИППН, получающих энергию от индуктивных накопителей L_1 и L_2 .

Особенностью применяемых здесь схем ИППН является то, что накопление энергии в индуктивности L_1 (L_2) происходит не только от источника постоянного напряжения U_0 при включенном V_1^1 (V_1^2), но и от конденсаторов C_1 (C_2) в

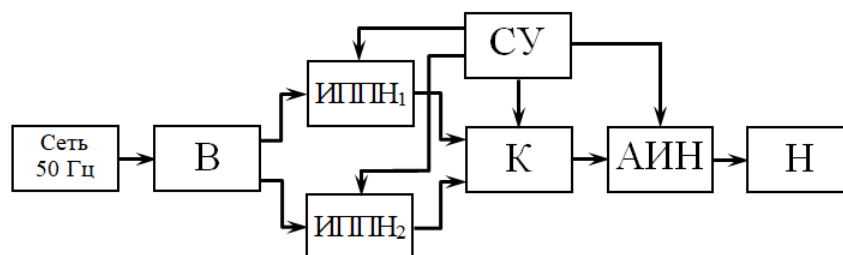


Рис. 3. Структурная схема преобразователя: Сеть 50 Гц – входная сеть переменного тока; В – выпрямитель; СУ – система управления преобразователем; ИППН₁ и ИППН₂ – импульсные преобразователи постоянного напряжения; К – коммутатор; АИН – однофазный мостовой инвертор напряжения; Н – нагрузка

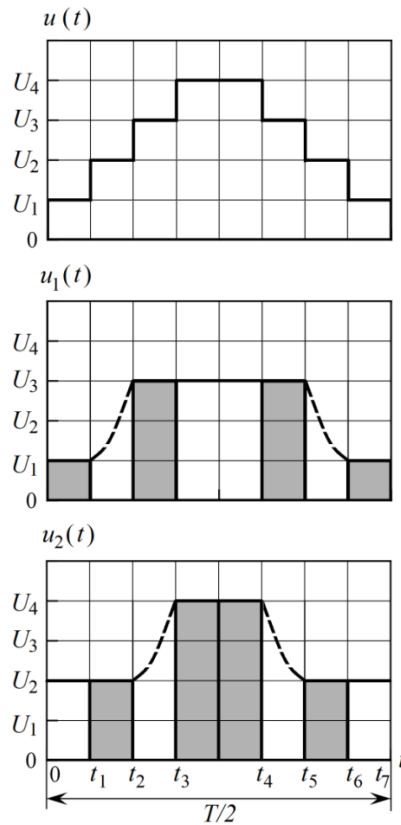


Рис. 4. Метод формирования выходной кривой

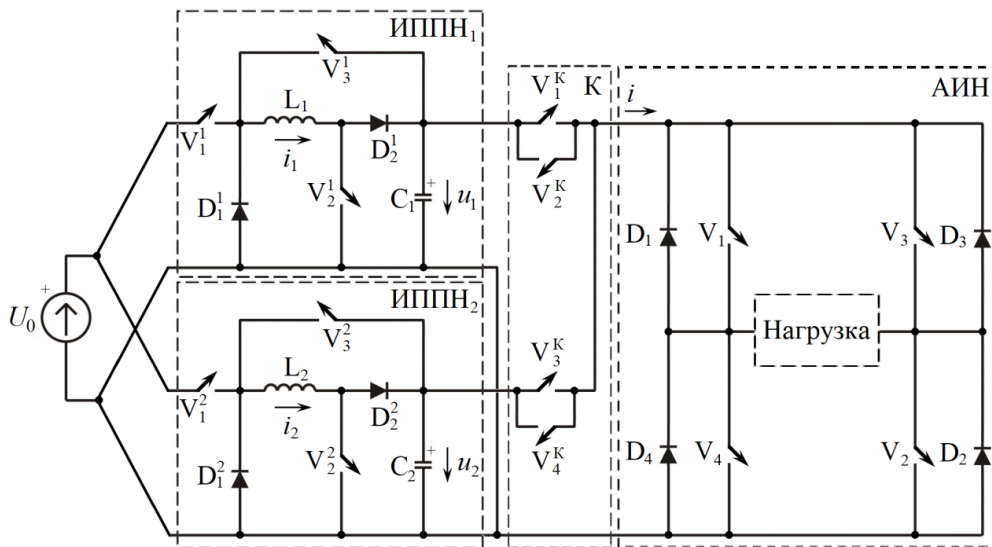


Рис. 5. Упрощенная схема многоуровневого преобразователя

те интервалы времени, в которые происходит возврат реактивной мощности нагрузки через обратные диоды инвертора и ключи V_2^k (V_4^k) коммутатора. При этом V_1^1 (V_1^2) выключены, а V_2^1 и V_3^1 (V_2^2 и V_3^2) включены, образуя цепь тока индуктивности L_1 (L_2), разряжающего для конденсатора C_1 (C_2). Тем самым компенсируется неуправляемый заряд этого конденсатора обратным током

инвертора, протекающим через ключи V_2^k (V_4^k) коммутатора.

Кроме того, накопление энергии в индуктивности L_1 (L_2) происходит также при разряде конденсаторов C_1 (C_2) в те подготовительные интервалы, когда осуществляется переход напряжения от более высокого уровня к более низкому.

Для отрицательной полуволны функционирование преобразователя происходит аналогич-

но и реализуется за счет силовых ключей инвертора V_1-V_4 .

Для решения поставленной задачи на множестве M -уровневых кривых Γ_M построим положительно определенную функцию параметров λ_k и θ_k , минимизация которой одним из стандартных методов позволит определить их значения для искомой кривой.

Пусть N – число первых значимых для данной задачи гармоник. Желаемые величины этих гармонических составляющих кривой напряжения обозначим через $K_{U(j)}^0$, $j = 0, 2, 3, \dots, N$. При решении стандартной задачи получения кривой, наиболее приближенной к синусоиде, эти значения принимают нулевые значения, однако в рассматриваемой общей задаче они могут принимать любые неотрицательные значения. Отсутствие в списке индексов значения 1 связано с тем, что мы рассматриваем гармонические составляющие, отнесенные к первой гармонике, и поэтому коэффициент $K_{U(1)}$ для любой кривой равен 1.

Близость произвольной многоуровневой кривой Z к кривой с желаемыми значениями Z^0 можно оценить следующей величиной

$$r(Z, Z^0) = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1}}^N (K_{U(j)} - K_{U(j)}^0)^2. \quad (24)$$

Здесь $K_{U(j)}$ – гармонические составляющие произвольной кривой Z из множества Γ_M , поэтому $r(Z, Z^0)$ является функционалом, определенным на этом множестве [15]. Поскольку коэффициенты $K_{U(j)}$ являются функциями параметров λ_k и θ_k кривой Z , то $r(Z, Z^0)$ одновременно является функцией этих параметров. Поэтому, минимизируя эту функцию по параметрам кривой, можно получить те их значения, при которых соответствующая многоуровневая кривая Z^* будет наиболее близка по значениям гармонических составляющих к кривой Z^0 .

Следует отметить, что кривая Z^0 в общем случае не входит в множество Γ_M . Поэтому кривая

$$Z^* = \arg \min_{Z \in \Gamma_M} r(Z, Z^0), \quad (25)$$

доставляющая минимум функционалу (24), имеет значения показателей $K_{U(j)}^*$, отличающиеся от желаемых $K_{U(j)}^0$, хотя и наиболее близкие к ним по сравнению с другими кривыми из Γ_M . Напряжения уровней кривой Z^* обозначим через λ_k^* .

В качестве метода минимизации целесообразно выбрать градиентный метод [16], поскольку мы располагаем явными выражениями производных

показателей качества $K_{U(j)}$ и K_U по параметрам кривой. При этом следует учитывать, что градиентный метод, как и большинство методов минимизации, является итерационным и, следовательно, находит не самую минимизирующую кривую Z^* , а лишь достаточно близкую к ней кривую Z_ε^* из Γ_M , удовлетворяющую условию

$$r(Z_\varepsilon^*, Z^0) < \varepsilon, \quad (26)$$

где ε – заранее заданное максимально допустимое значение минимизируемой функции. Таким образом, в результате решения задачи синтеза M -уровневой кривой с желаемым гармоническим составом градиентным методом мы определяем напряжения уровней кривой, удовлетворяющей условию (26). Набор этих уровней обозначим через $\lambda_{k,\varepsilon}^*$, $k = \overline{1, M}$.

Функция (24) наиболее наглядно соответствует цели минимизации, и поэтому будет использоваться ниже для оценки точности решения задачи. Однако для удобства применения градиентного метода ее целесообразно заменить следующей функцией, достигающей минимума при одних и тех же значениях λ_k и θ_k , что и $r(Z, Z^0)$:

$$\rho(Z, Z^0) = \frac{1}{2} K_U^2 - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1}}^N K_{U(j)}^0 \cdot K_{U(j)}. \quad (27)$$

Здесь K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой Z . Функции $r(Z, Z^0)$ и $\rho(Z, Z^0)$ отличаются только на постоянное слагаемое и поэтому достигают минимума.

Для реализации градиентного метода минимизации функции $\rho(Z, Z^0)$ найдем ее градиент, как функции в λ_k . Координаты градиента \vec{G}_λ функции $\rho(Z, Z^0)$ от параметров λ_k при фиксированных параметрах θ_k равны

$$G_{\lambda,k} = \frac{\partial \rho}{\partial \lambda_k} = \frac{\partial K_U}{\partial \lambda_k} - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1}}^N K_{U(j)}^0 \cdot \frac{\partial K_{U(j)}}{\partial \lambda_k} \quad (k = \overline{1, M}).$$

Теперь реализацию градиентного метода можно свести к следующим действиям:

1. Задаются начальный номер шага итерационного процесса $i = 1$ и максимально допустимое значение ε минимизируемой функции (27).

2. Выбирается начальное приближение кривой Z_1 . Например, можно рекомендовать рассмотренную в начале статьи кривую со значениями напряжений уровней

$$\lambda_k = \sin\left(\frac{\theta_k + \theta_{k+1}}{2}\right) \quad (k = \overline{1, M}).$$

3. Осуществляется шаг итерационного процесса спуска к минимуму по следующей схеме

$$\lambda_{k,i+1} = \lambda_{k,i} - h_\lambda \cdot G_{\lambda,k}(i) \quad (k = \overline{1, M}), \quad (28)$$

где i – номер шага итерационного процесса; $\lambda_{k,i}$ и $\lambda_{k,i+1}$ – значения параметров на i -м и $(i + 1)$ -м шаге процесса; h_λ – шаг движения по параметру λ_k ; $G_{\lambda,k}(i)$ – координаты градиента, рассчитанного на i -м шаге.

Набор параметров $\lambda_{k,i+1}$ определяет очередное приближение Z_{i+1} к желаемой кривой.

4. Используя формулы (10), (19), (22) и (23), определяется значение

$$r_{i+1} = r(Z_{i+1}, Z^0)$$

минимизируемой функции (24) при значениях параметров, полученных на предыдущем шаге.

5. Если выполняется условие $r_{i+1} \leq \varepsilon$, то задача считается решенной. При этом искомые значения параметров кривой Z_ε^* считаются равными

$$\lambda_{k,\varepsilon}^* = \lambda_{k,i+1} \quad (k = \overline{1, M}),$$

то есть полученными на последнем шаге. Если же $r_{i+1} > \varepsilon$, то осуществляется возврат к пункту 3.

По приведенному алгоритму следует сделать следующее замечание.

Для более детальной оценки степени достижения целей минимизации величину $r(Z, Z^0)$ из (24) целесообразно представить в виде суммы двух составляющих $r(Z, Z^0) = r_+(Z, Z^0) + r_0(Z, Z^0)$, где

$$r_+(Z, Z^0) = \sum_{J_+} (K_{U(j)} - K_{U(j)}^0)^2;$$

$$r_0(Z, Z^0) = \sum_{J_0} K_{U(j)}^2.$$

В этих формулах J_+ есть множество номеров гармоник, для которых $K_{U(j)}^0 > 0$, а J_0 – множество номеров гармоник, для которых $K_{U(j)}^0 = 0$.

Величина $r_+(Z, Z^0)$ характеризует степень близости значений тех гармонических составляющих кривой Z , которые вводятся в спектр кривой в соответствии с технологическими требованиями (например, при индукционном нагреве деталей сложной формы), к их желаемым значениям.

Величина $r_0(Z, Z^0)$ характеризует наличие в спектре «ненужных» гармоник. Очевидно, величина $\sqrt{r_0(Z, Z^0)}$ аналогична суммарному коэффициенту гармонических составляющих K_U при решении нахождения кривой, максимально приближенной к синусоиде.

На рис. 6–8 показаны результаты компьютерного моделирования синтеза многоуровневой кривой с желаемым гармоническим составом за счет изменения напряжений уровней по предлагаемому алгоритму.

На рис. 6 представлены результаты синтеза многоуровневой кривой с желаемыми величинами 3-й и 5-й гармоник, равными 0,7 и 0,3 соответственно. В этом случае степень близости значений этих гармонических составляющих многоуровневой кривой к их желаемым значениям $r_+(Z, Z^0)$ равна 0,002, а коэффициент «засоренности ненужными гармониками» $r_0(Z, Z^0) = 0,026$. Таким образом, степень достижения целей минимизации $r(Z, Z^0)$ составляет величину, равную 0,028.

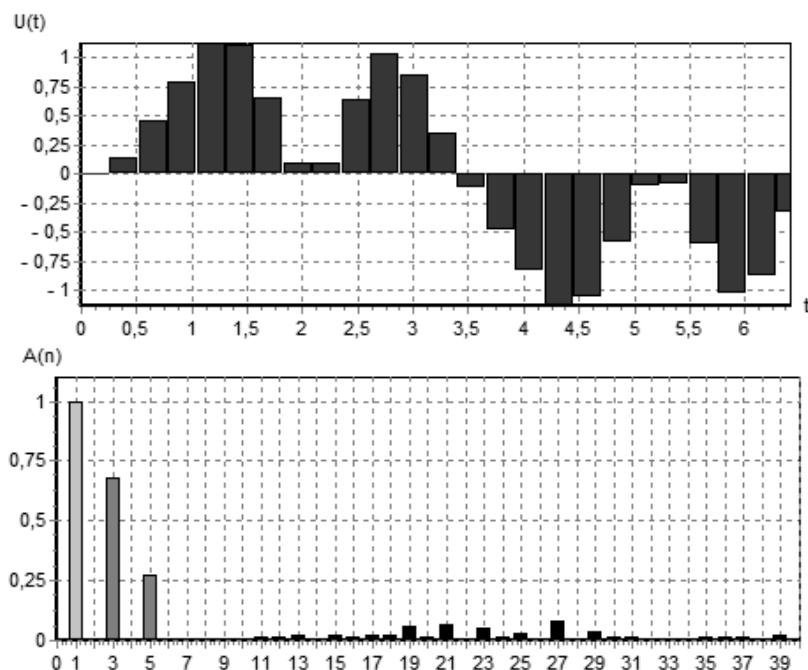


Рис. 6. Результаты синтеза многоуровневой кривой с величинами 3-й и 5-й гармоник, равными 0,7 и 0,3 соответственно, $r_+(Z, Z^0) = 0,002$, $r_0(Z, Z^0) = 0,026$, $r(Z, Z^0) = 0,028$

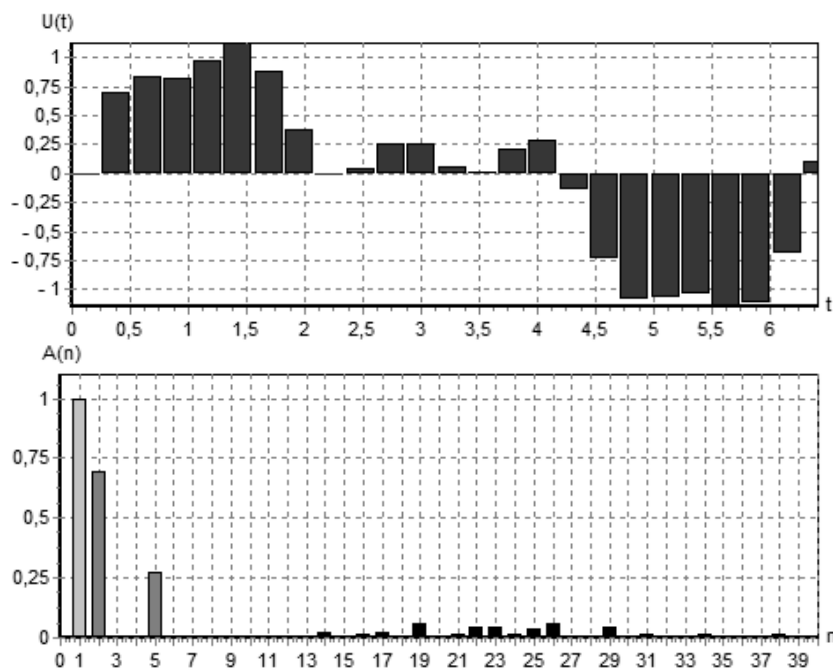


Рис. 7. Результаты синтеза многоуровневой кривой с величинами 2-й и 5-й гармоник, равными 0,7 и 0,3 соответственно, $r_+(Z, Z^0) = 0,001$, $r_0(Z, Z^0) = 0,017$, $r(Z, Z^0) = 0,018$

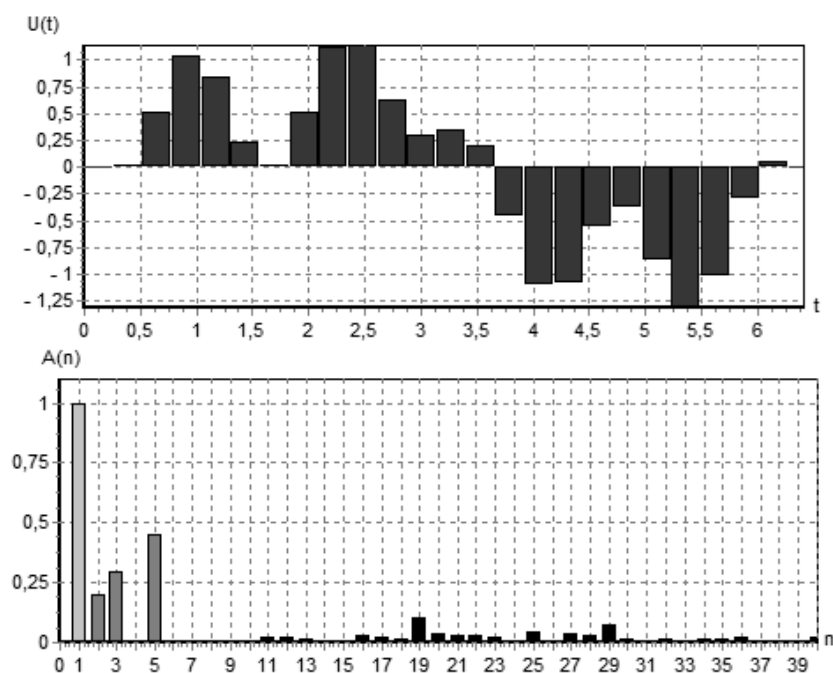


Рис. 8. Результаты синтеза многоуровневой кривой с величинами 2-й, 3-й и 5-й гармоник, равными 0,2, 0,5 и 0,3 соответственно, $r_+(Z, Z^0) = 0,003$, $r_0(Z, Z^0) = 0,028$, $r(Z, Z^0) = 0,031$

На рис. 7 представлены результаты синтеза многоуровневой кривой с желаемыми величинами 2-й и 5-й гармоник, равными 0,7 и 0,3 соответственно. В этом случае степень близости значений этих гармонических составляющих многоуровневой кривой к их желаемым значениям $r_+(Z, Z^0)$ равна 0,001, а коэффициент «засоренности ненужными гармониками» $r_0(Z, Z^0)$ – 0,017. Таким об-

разом, степень достижения целей минимизации $r(Z, Z^0)$ составляет величину, равную 0,018.

На рис. 8 представлены результаты синтеза многоуровневой кривой с желаемыми величинами 2-й, 3-й и 5-й гармоник, равными 0,2, 0,5 и 0,3 соответственно. В этом случае степень близости значений этих гармонических составляющих многоуровневой кривой к их желаемым значениям

$r_+(Z, Z^0)$ равна 0,003, а коэффициент «засоренности ненужными гармониками» $r_0(Z, Z^0) = 0,028$. Таким образом, степень достижения целей минимизации $r(Z, Z^0)$ составляет величину, равную 0,031.

Заключение

1. Предложена методика расчета чувствительности показателей качества выходного напряжения многоуровневых инверторов напряжения к отклонениям величин его параметров от оптимальных значений, обеспечивающая возможность решения задачи синтеза многоуровневой кривой с желаемым гармоническим составом. Это заметно расширяет функциональные возможности рассматриваемого класса преобразовательных устройств, что способствует росту их применения в современных промышленных технологиях, качество которых в значительной степени определяется спектром питающего напряжения, например, в системах индукционного нагрева.

2. Разработан алгоритм синтеза многоуровневой кривой выходного напряжения с задаваемым гармоническим составом, наиболее соответствующим реализуемому технологическому процессу.

3. Результаты компьютерного моделирования синтеза многоуровневой кривой с желаемым гармоническим составом за счет изменения напряжений уровней по предлагаемому алгоритму при различных величинах выбранных гармоник показывают его универсальность, наглядность и информативность за счет оценки степени близости значений коэффициентов гармонических составляющих многоуровневой кривой к их желаемым значениям и коэффициента «засоренности ненужными гармониками».

Литература

1. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб. / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.

2. Rodriguez, J. Multilevel Inverters: Survey of Topologies, Controls, and Applications / J. Rodriguez, J.S. Lai, F.Z. Peng // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2002. – Vol. 49, no. 4. – P. 724–738. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052

3. Power Electronics Handbook / H. Muhammad Rashid (Ed.). – Butterworth-Heinemann, 2018. – 1522 p.

4. Strzelecki, R. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks / R. Strzelecki, G. Benysek. – Springer-Verlag London Limited, 2008. – 421 p.

5. Smart Power Grids 2011 / Ali Keyhani, Mu-

hammad Marwali (Ed.). – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – 701 p.

6. Multi-level Inverter: A Literature Survey on Topologies and Control Strategies / B. Singh [et al.] // International Journal of Reviews in Computing. – 2012. – Vol. 10. – P. 1–16. DOI: 10.1109/IJCPES.2012.6508041

7. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. – 10 с.

8. Дзюев, С.В. Принципы построения систем питания установок индукционной закалки зубчатых колес при двухчастотном нагреве / С.В. Дзюев // АРИН 05: Материалы междунар. конф. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – С. 193–201.

9. Формирование двухчастотных колебаний тока в системах индукционного нагрева / С.К. Земан [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, № 4. – С. 105–111.

10. Юшков, А.В. Энергетически эффективные преобразователи частоты для двухчастотной индукционной плавки: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Юшков. – Томск, 2012. – 19 с.

11. Рогинская, Л.Э. Полупроводниковый преобразователь частоты с многофункциональным трансформатором / Л.Э. Рогинская, А.Р. Латыпов // Практическая силовая электроника. – 2017. – № 3 (67). – С. 37–41.

12. Стабилизация параметров выходного напряжения многоуровневых инверторов / Е.Е. Миргородская, В.А. Колчев, Н.П. Митяшин, Е.Д. Карнаухов // Вопросы электротехнологии. – 2018. – № 1 (18). – С. 70–79.

13. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.

14. Universal Power Source of Single-phase Multilevel Inverters / E.E. Mirgorodskaya [et al.] // 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2019 – Proceedings. – Varna; Bulgaria, 2019. – P. 337–341. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771654

15. Колмогоров, А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – 7-е изд. – М.: Физматлит, 2012. – 572 с.

16. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс: пер. с англ. / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

Миргородская Екатерина Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электронные приборы и системотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов; mee85@inbox.ru.

Митяшин Никита Петрович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электронные приборы и системотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов; mityashinnp@mail.ru.

Томашевский Юрий Болеславович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электронные приборы и системотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов; yurytomash@mail.ru.

Мирошниченко Алексей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, кафедра «Электронные приборы и системотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов; alexm2005@list.ru.

Поступила в редакцию 8 сентября 2019 г.

DOI: 10.14529/power190414

INFLUENCE OF VOLTAGE LEVELS AND ANGLES OF THE MULTILEVEL INVERTER LEVEL SWITCHING ON THE STRUCTURE OF ITS OUTPUT VOLTAGE SPECTRUM

E.E. Mirgorodskaya, Ymee85@inbox.ru,
N.P. Mityashin, mityashinnp@mail.ru,
Yu.B. Tomashevsky, yurytomash@mail.ru,
A.Yu. Miroschnichenko, alexm2005@list.ru

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

Multilevel voltage inverters are currently widely used in various power systems, as they are an efficient method to form the output voltage harmonic composition. The implemented multilevel concept allows controlling the composition and magnitude of output harmonics, which is relevant for the power supply systems feeding technological processes, quality-sensitive to the spectrum of the supply voltage. The paper proposes an approach to determine the influence of parameter changes in a multilevel inverter on the spectrum of its output voltage. It allows solving the problem of synthesizing of a multilevel curve with the desired harmonic composition. The authors obtain the formulas instrumental to calculate the sensitivity of harmonic voltage components coefficients and the total coefficient of harmonic voltage components to changes in input voltage levels and electrical angles of their switching in the inverter. The paper presents an algorithm, developed to synthesize a multilevel output voltage curve with a given harmonic composition that is most appropriate for the realized technological process. The results of computer simulation of the synthesis of a multilevel curve with the desired harmonic composition due to changes in voltage levels at various values of selected harmonics show its universality, clarity and information content. The presented approach to the design of the considered type of converting devices significantly expands the functionality of multilevel voltage inverters, which contributes to their application in modern industrial technologies, the quality of which is largely determined by the supply voltage spectrum, for example, in systems of multi-frequency induction heating.

Keywords: multilevel voltage inverter, coefficient of harmonic voltage components, voltage level, angle of level switching, gradient, sensitivity.

References

1. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Power Electronics Basics]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2000. 197 p.
2. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel Inverters: Survey of Topologies, Controls, and Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724–738. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052
3. Rashid M.H. (Ed.). *Power Electronics Handbook*. Butterworth-Heinemann, 2018. 1522 p.
4. Strzelecki R. Benysek G. *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*. Springer-Verlag London Limited, 2008. 421 p.
5. Keyhani A., Marwali M. (Ed.). *Smart Power Grids 2011*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 701 p.

6. Mittal N., Singh B., Singh S.P., Dixit R., Kumar D. Multi-Level Inverter: A Literature Survey on Topologies and Control Strategies. *International Journal of Reviews in Computing*, 2012, vol. 10, pp. 1–16. DOI: 10.1109/ICPCES.2012.6508041
7. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144–2013. Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Quality Standards for Electric Energy in General Power Supply Systems], Moscow, Standartinform Publ., 2013. 10 p. (in Russ.)
8. Dzljev S.V. [Principles of Constructing Power Systems for Induction Hardening Gears with Dual-Frequency Heating]. АПИИ 05. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” Publ., 2005, pp. 193–201. (in Russ.)
9. Zeman S.K., Kazantsev Yu.M., Osipov A.V., Yushkov A.V. *Formirovanie dvukhchastotnykh kolebaniy toka v sistemakh induktsionnogo nagreva* [Formation of Dual-Frequency Current Oscillations in Induction Heating Systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 105–111 (in Russ.)
10. Yushkov A.V. *Energeticheski effektivnye preobrazovateli chastoty dlya dvukhchastotnoy induktsionnoy plavki. Avtoref. kand. diss.* [Energy-Efficient Frequency Converters for Dual-Frequency Induction Melting. Abstract of cand. diss.]. Tomsk, 2012. 19 p.
11. Roginskaya L.E., Latypov A.R. *Poluprovodnikovyy preobrazovatel' chastoty s mnogofunktional'nyim transformatorom* [Semiconductor Frequency Converter with Multifunction Transformer] *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2017, no. 3 (67), pp. 37–41. (in Russ.)
12. Mirgorodskaya E.E., Kolchev V.A., Mityashin N.P., Karnaukhov E.D. *Stabilizatsiya parametrov vykhodnogo napryazheniya mnogourovnevnykh invertorov* [Stabilization of Output Voltage Parameters of Multilevel Inverters]. *Voprosy elektrotekhnologii* [Journal of Electrotechnics], 2018, no. 1 (18), pp. 70–79. (in Russ.)
13. Krasovskiy A.A. (Ed.). *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook of Automatic Control Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p.
14. Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Kolchev V.A., Tomashevsky Yu.B., Stepanov S.F., Artyukhov D.I. Universal Power Source of Single-Phase Multilevel Inverters. *16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2019*, 2019, Varna; Bulgaria, pp. 337–341. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771654
15. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of Function Theory and Functional Analysis]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 572 p.
16. Bandi B. *Metody optimizatsii. Vvodnyy kurs* [Optimization Methods. Introductory Course]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988. 128 p.

Received 8 September 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние уровней напряжения и углов их включения в многоуровневом инверторе на структуру спектра его выходного напряжения / Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, А.Ю. Мирошниченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 120–131. DOI: 10.14529/power190414

FOR CITATION

Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevsky Yu.B., Miroshnichenko A.Yu. Influence of Voltage Levels and Angles of the Multilevel Inverter Level Switching on the Structure of Its Output Voltage Spectrum. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 120–131. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190414