

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИНВЕРТОРОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ ВЫХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

АНИСИМОВА Татьяна Викторовна — Московский авиационный институт (государственный технический университет), аспирант
Тел.: (499)158-45-59

Tatyana V. ANISIMOVA — Moscow Aviation Institute (State Technical University), postgraduate
Phone: (499)158-45-59

ДАНИЛИНА Анастасия Николаевна — Московский авиационный институт (государственный технический университет), аспирант
Тел.: (499)158-45-59

Anastasiya N. DANILINA — Moscow Aviation Institute (State Technical University), postgraduate
Phone: (499)158-45-59

КРЮЧКОВ Василий Васильевич — Московский авиационный институт (государственный технический университет), доцент, к.т.н.
Тел.: (499)158-45-59

Vasily V. KRYUCHKOV — Moscow Aviation Institute (State Technical University), associate professor, candidate of science
Phone: (499)158-45-59

В статье проведена сравнительная оценка двух стратегий формирования напряжений для управления инверторами с многоуровневым (ступенчатым) выходным напряжением — исключения гармоник с регулированием напряжений (ИГРН) и оптимальной минимизации коэффициента гармоник (ОМКГ). Оба способа крайне важны и эффективны для повышения качества выходного напряжения инвертора. Первый способ позволяет исключить из спектра выходного напряжения инвертора заданные низшие из высших гармоник, а второй — оптимизировать величину коэффициента гармоник выходного напряжения инвертора. Сначала представлено краткое описание основных идей и понятий каждого способа. Затем рассмотрены их характеристики и проведено их сравнение. Представлены результаты моделирования и проведено их сравнение.

This paper is devoted to the comparative evaluation of the two modulation strategies developed for multilevel inverters control: the harmonic elimination technique with voltage control (OHSW) and the optimal minimization of the total harmonic distortion method (OMTHD), which are a very important and efficient strategies of eliminating selected harmonics from spectrum of the output voltage or minimizing its total harmonic distortion in order to improve its quality. First, we describe briefly the basic idea and concept of each technique. Then, we present a study of the performances of each one by the means of a comparison between them. Simulation has also been presented to establish the effectiveness of the proposed analysis.

Ключевые слова: инвертор; ступенчатое напряжение; коэффициент гармоник; спектральный состав, широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

Key words: inverter, cascade voltage, total harmonic distortion (THD), harmonic elimination, pulse width modulation (PWM).

В настоящее время большинство приводов электрических машин представляют собой системы трехфазного переменного тока. Эти приводы обеспечивают работу с переменной скоростью — хорошим примером такого привода является управление подвижным составом городского транспорта. При таком режиме работы в состав приводов должен входить преобразователь, на выходе которого формируется переменное напряжение переменной частоты.

Существует несколько систем приводов электрических машин переменного тока с изменяемой скоростью. В статье будут рассмотрены только инверторы. Первые инверторы имели двухуровневое выходное напряжение. Вследствие увеличивающихся мощностей и более строгих ограничений по коэффициенту гармоник такие структуры затруднительно использовать в таких областях, как городской транспорт и системы распределения электроэнергии. Таким образом, в этих областях требуются структуры, известные как «многоуровневые», которые позволяют решить эти проблемы. Впервые многоуровневая система, в которой не использовался трансформатор, представлена в [1].

Основная функция таких многоуровневых структур состоит в формировании желаемой формы переменного напряжения с помощью нескольких источников постоянного напряжения. Таким образом, эти структуры позволяют преодолеть ограничения по напряжению полупроводниковых компонентов, имеющих место в двухуровневых структурах, а также повысить качество выходного напряжения за счет, например, уменьшения коэффициента гармоник [1—7].

В литературе приведено большое количество различных структур, применяемых в промышленности, например статические компенсаторы реактивной мощности, высоковольтная вставка постоянного тока, приводы переменной скорости и активная фильтрация.

Наиболее перспективным представляется инвертор со ступенчатым выходным напряжением, в котором используется каскадное включение мостовых инверторов с отдельными источниками питания, который далее будем называть «каскадным многоуровневым инвертором», поскольку его структура не только модульная и наиболее простая, но также содержит наименьшее число компонентов [6]. Модульность такой структуры позволяет легко увеличивать число ступеней выходного напряжения без нежелательного усложнения силовой части инвертора. Кроме того, при этом не требуются дополнительные ограничительные диоды и конденсаторы для симметрирования напряжений.

Для управления такой многоуровневой структурой (или другими аналогичными типами многоуровневых структур) существует целый ряд представляющих интерес эффективных стратегий модуляции. Как правило, эти стратегии получены на основе стратегий управления двухуровневыми структурами. По частоте переключений все эти стратегии можно разделить на две группы: схемы, работающие с низкими частотами переключений, и схемы, работающие с высокими частотами переключений. Наиболее известными являются:

- методы субгармонической широтно-импульсной модуляции, называемые также методами синусоидальной ШИМ или синусоидально-треугольной ШИМ;
- методы вычисляемой ШИМ;
- методы пространственно-векторной модуляции;
- методы сигма-дельта-модуляции;
- комбинированные методы, объединяющие два или более из названных методов.

В статье рассмотрены два альтернативных способа вычисляемой ШИМ (принадлежащих к первой группе): общая методика исключения гармоник с регулированием напряжения и метод оптимальной минимизации коэффициента гармоник. Оба метода применены к каскадному многоуровневому инвертору. Цель статьи — противопоставление этих двух способов, рассмотренных в [1—11]. Вопрос состоит в том, какой из способов предпочтительнее для управления инверторами и насколько велики их различия. Сравнение проведено по нескольким аспектам. Особенно различие методов будет оцениваться в понятиях полного коэффициента гармоник. Для этой цели проведена количественная оценка гармоник, содержащихся в выходных напряжениях инверторов со ступенчатым выходным напряжением.

Для достижения указанной цели сначала приводится описание каскадного многоуровневого инвертора, за которым следует описание базовой схемы формирования импульсов, используемой для управления инвертором. С помощью этой схемы формируется ступенчатое напряжение, при этом она включает большое количество режимов управления для формирования желаемого синусоидального напряжения. В ее функции входит, соответственно, снижение или исключение низших из высших гармонических составляющих за счет вычисления моментов (углов) переключения ключей силовой части инвертора.

Приведены сравнение двух вышеупомянутых вариантов управления и результаты моделирования. Наконец, представлен краткий анализ полученных

результатов, и по ним сделаны выводы. Кроме того, даны предложения по возможным перспективным исследованиям в области управления многоуровневыми инверторами.

Структура многоуровневого инвертора и форма выходного напряжения

Структура силовой части многоуровневого инвертора (со ступенчатым выходным напряжением) показана на рис. 1. Она состоит из последовательности ячеек в виде однофазных мостовых схем. Каждая ячейка силовой части формирует часть выходного напряжения $U_{\text{вых}i}$ ($i = 1, 2, \dots, s$ — число мостовых ячеек силовой части) трех разных величин (уровней) $+U_i, 0, -U_i$ за счет подключения постоянного входного напряжения U_i при переключении четырех силовых ключей ячейки [7–9]. При этом величины постоянных входных напряжений ячеек могут различаться между собой. Таким образом, эти напряжения могут быть одинаковыми, а могут быть и разными.

Выходное напряжение можно выразить следующей формулой:

$$U_i = U_{\text{вых}i}(f_{i1} - f_{i2}), \quad (1)$$

где f_{i1} и f_{i2} — соответственно переключающие функции верхних ключей (S_{i1} и S_{i3}) мостового комму-

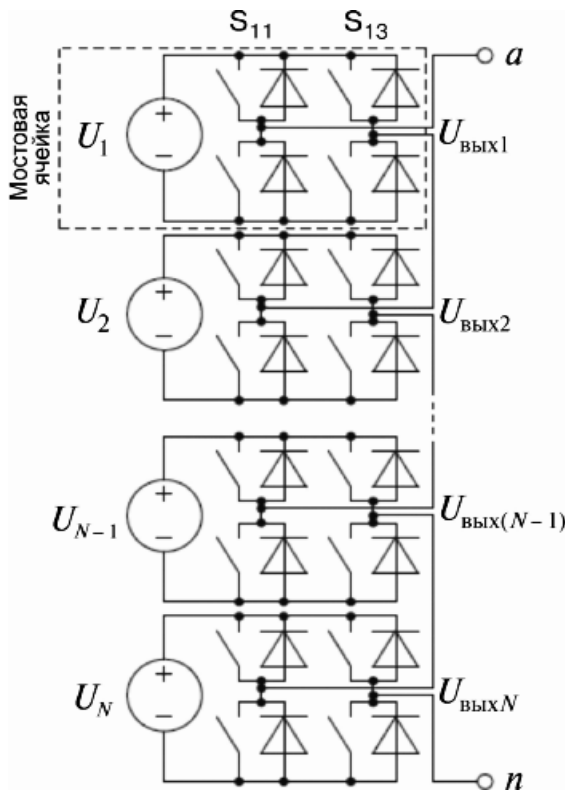


Рис. 1. Структура однофазного инвертора со ступенчатым выходным напряжением

татора i -й ячейки силовой части инвертора, определяющие состояние силового ключа (замкнут, разомкнут).

Таким образом, переменное выходное напряжение U_{an} есть сумма выходных напряжений отдельных ячеек силовой части инвертора:

$$U_{an} = U_{\text{вых}1} + U_{\text{вых}2} + \dots + U_{\text{вых} s} = \sum_{i=1}^s U_{\text{вых} i}. \quad (2)$$

Воспользовавшись переключающими функциями, выражение (2) можно привести к виду

$$U_{an} = U_1(f_{11} - f_{12}) + \dots + U_s(f_{s1} - f_{s2}). \quad (3)$$

Для трехфазной системы выходы трех одинаковых структур однофазных инверторов могут быть соединены либо звездой, либо треугольником. Например, линейное напряжение U_{AB} будет разностью напряжений фаз A и B , что эквивалентно записи

$$U_{AB} = U_{An} - U_{Bn}. \quad (4)$$

Максимальное число ступенек фазного напряжения может быть равно 3^s , где s — число ячеек однофазных мостовых коммутаторов силовой части инвертора.

Обобщенная форма ступенчатого напряжения, формируемого на выходе каскадного многоуровневого инвертора при низкой частоте переключений ключей мостовых коммутаторов ячеек силовой части (рис. 1), показана на рис. 2. Такая форма ступенчатого напряжения принята базовой формой напряжения U_{an} , аппроксимирующего синусоидальное. Она представляет собой типовую обобщенную форму многоуровневого (ступенчатого) напряжения, формируемого с помощью методов модуляции, на основе рассчитанных (заданных) моментов (углов) переключения. Весь дальнейший анализ основан на такой форме выходного напряжения инвертора. Напряжение, показанное на рис. 2, обладает свойствами полуволновой и четвертьволновой симметрии. Оно содержит за период $4s$ углов переключения: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ — и включает в себя ряд уровней напряжений, равных, или не равных по величине.

Обзор обобщенных способов формирования оптимального ступенчатого напряжения

При выборе параметров обобщенной формы существуют три возможных способа оптимизации для уменьшения коэффициента гармоник выходного напряжения инвертора.

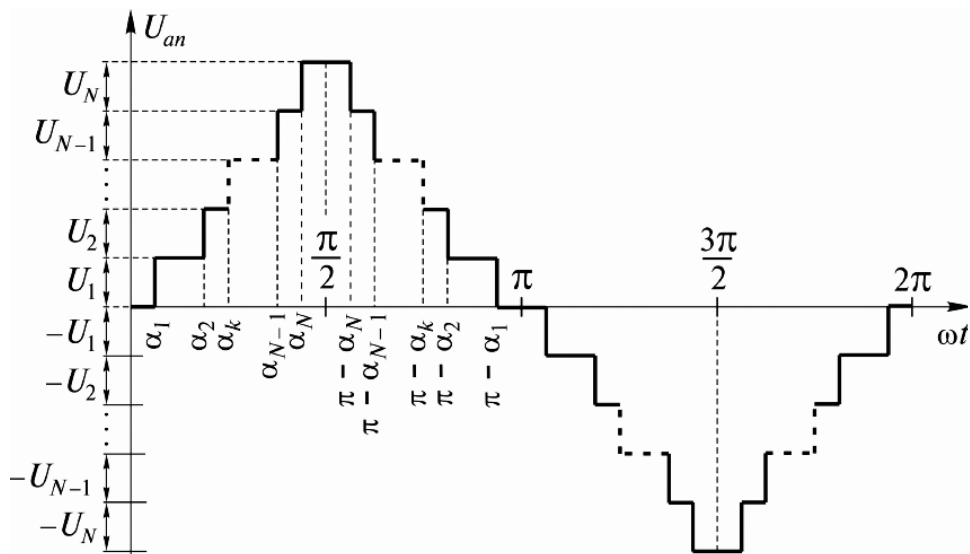


Рис. 2. Обобщенная базовая форма ступенчатого напряжения

- Способ оптимизации, основанный на выборе амплитуд (высоты) ступенек. В этом случае используется обобщенная форма с одинаковыми длительностями ступенек или одинаковыми расстояниями между ступеньками (т. е. одинаковыми расстояниями между углами переключений) и различными высотами ступенек (рис. 3,а). Для реализации такой формы напряжения необходимы источники постоянного напряжения различной величины.

- Способ оптимизации, основанный на изменении расстояния между ступеньками. Для этого случая используется обобщенная форма (рис. 3,б), называемая «ступенчатым напряжением с регулярной структурой» с одинаковой высотой (амплитудой) и изменяемой длительностью ступенек (изменяемый промежуток между ступеньками). Для реализации такой формы напряжения требуются источники постоянного напряжения одинаковой величины, т. е. $U_1 = U_2 = \dots = U_s = U$.

- Способ оптимизации, основанный на изменении высот ступенек и расстояний между ними. Произвольная обобщенная форма ступенчатого напряжения показана на рис. 3,в. Как и в первом случае, для реализации такой формы напряжения требуются источники постоянного напряжения различной величины.

Способы улучшения качества обобщенной формы ступенчатого напряжения

После выбора способа оптимизации обобщенной формы ступенчатого напряжения для улучшения его качества можно воспользоваться одним из способов управления. Основными способами уп-

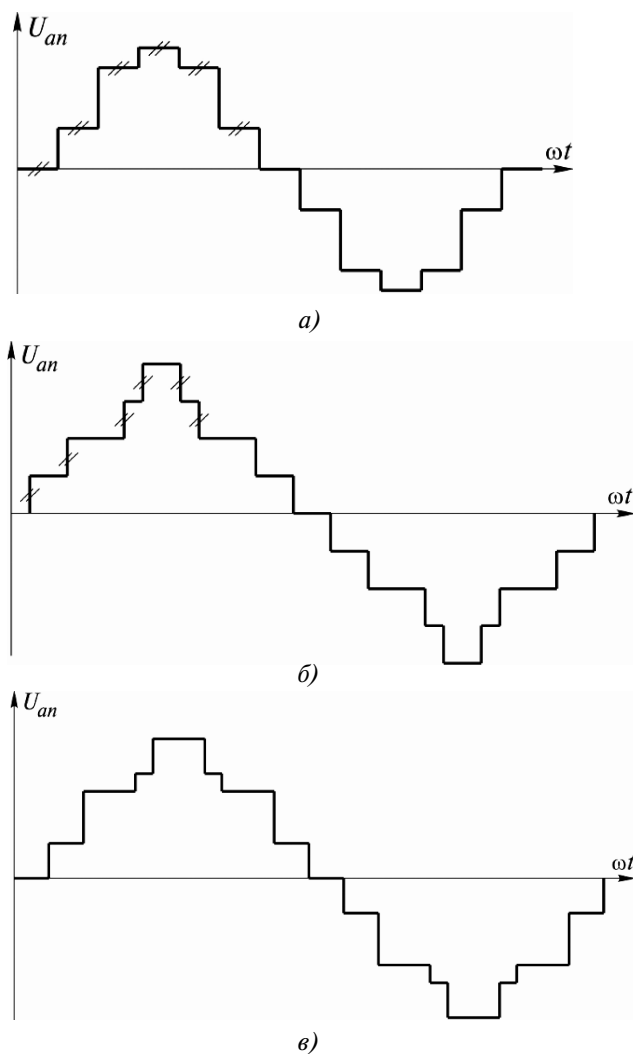


Рис. 3. Обобщенные формы ступенчатого напряжения:
 а — с одинаковыми расстояниями между ступеньками; б — с регулярной структурой;
 в — произвольная форма

правления, позволяющими улучшить качество ступенчатого напряжения, являются:

- исключение гармоник, при котором моменты (углы) переключения выбираются таким образом, чтобы из спектра ступенчатого напряжения исключить ряд выбранных (как правило, низших из высших) гармоник, что приводит к снижению коэффициента гармоник [8, 9];

- оптимальный способ минимизации, при котором моменты (углы) переключения выбираются такими, чтобы наиболее эффективно снизить коэффициент гармоник выходного ступенчатого напряжения инвертора, при этом, в общем случае, амплитуды гармоник существенно снижаются без их исключения [10–12].

Далее оба эти способа будут кратко рассмотрены и, для упрощения анализа, применены для исследования к ступенчатому напряжению с регулярной структурой.

Способ исключения гармоник

Обобщенный способ исключения гармоник для выходных напряжений ступенчатой формы называется «оптимальная форма ступенчатого напряжения» (ОФСН). Целью способа является снижение коэффициента гармоник выходного напряжения инвертора. Основная идея этого способа состоит в исключении заданных гармоник, как правило низших из высших, за счет соответствующего выбора моментов (углов) переключения ключей мостового коммутатора. Он реализуется с помощью грамотного использования режима ШИМ с селективным исключением гармоник (ШИМ-СИГ), применяемого в схемах управления трехуровневыми инверторами на основе однополярной ШИМ [16], к обобщенным ступенчатым формам, получаемым от источников постоянного напряжения различной величины.

В силу симметрии выбранной обобщенной формы напряжения, показанной на рис. 2, в ней существуют только нечетные гармоники. По этой причине коэффициенты Фурье для такой формы напряжения, которые рассчитываются, как простая сумма коэффициентов всех прямоугольных напряжений, вычисляются по выражению

$$a_q = \frac{4}{\pi q} \sum_{k=1}^s U_k \cos(q\alpha_k). \quad (5)$$

Полагая, что рассматривается форма напряжения с регулярной структурой, т. е. $U_1 = U_2 = \dots = U_s = U$, получаем выражение

$$A_q = \frac{4U}{\pi q} \sum_{k=1}^s U_k \cos(q\alpha_k), \quad (6)$$

где U — величина постоянного напряжения источника питания; q — номер гармоники; s — число источников постоянного напряжения (или ячеек силовой части инвертора); α_k — оптимизированные для исключения гармоник моменты (углы) переключения за четверть периода выходного напряжения.

Очевидно, что величины этих углов должны постоянно удовлетворять условию

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_s < \frac{\pi}{2}. \quad (7)$$

Амплитуду любой гармоники можно определить, подставив в (6) номер соответствующей гармоники. Это уравнение может быть решено для M переменных $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ на основе критерия эффективности следующим образом:

- приравнять амплитуд $N = s$ первых низших из высших гармоник к нулю для их исключения;

- для обеспечения регулирования выходного напряжения с одновременным исключением высших гармоник приравнять к нулю амплитуды $N = s - 1$ высшей гармоники и присвоить определенное значение амплитуде основной гармоники.

Второй способ будет использован при дальнейшем анализе.

Как правило, для однофазной системы требуется исключать низшие из высших гармонических составляющих, начиная с третьей. В то же время для трехфазной системы не требуется исключения гармоник, кратных трем. Таким образом, для исключения $s - 1$ гармоники из выходного напряжения инвертора необходимо определить s углов переключения. Математически это означает формирование на основе (6) $N = s - 1$ уравнений. После некоторых преобразований эти уравнения можно записать в следующем виде:

для однофазного инвертора

$$\begin{cases} \cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \dots + \cos(\alpha_s) = \frac{sM\pi}{4}; \\ \cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) + \dots + \cos(3\alpha_s) = 0; \\ \vdots \\ \cos(N\alpha_1) + \cos(N\alpha_2) + \dots + \cos(N\alpha_s) = 0; \end{cases} \quad (8)$$

для трехфазного инвертора

$$\begin{cases} \cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \dots + \cos(\alpha_s) = \frac{sM\pi}{4}; \\ \cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \dots + \cos(5\alpha_s) = 0; \\ \vdots \\ \cos(N\alpha_1) + \cos(N\alpha_2) + \dots + \cos(N\alpha_s) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где $M = A_1/(sU)$ — индекс модуляции; A_1 — амплитуда основной гармоники.

Решение обеих систем, являющихся нелинейными, находится с помощью алгоритма на основе метода Ньютона—Рафсона либо другими итерационными методами решения систем нелинейных уравнений [4, 5].

Оптимальная минимизация коэффициента гармоник

Основная идея метода оптимальной минимизации коэффициента гармоник (ОМКГ), описанного в [6—8] и подтвержденного в [11], состоит в вычислении углов переключения, позволяющих минимизировать коэффициент гармоник выходного напряжения инвертора. Для минимизации коэффициента гармоник необходимо, чтобы его частные производные по каждому углу переключения были равны нулю. Это означает, что частные производные от квадрата коэффициента гармоник по углам переключения также должны быть равны нулю (коэффициент гармоник является положительной величиной).

После преобразований и упрощений формула для определения коэффициента гармоник выбранной обобщенной формы ступенчатого напряжения (периодической с четвертьволновой симметрией), показанной на рис. 2, выглядит следующим образом [6]:

$$k_r = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot \left(\sum_{k=1}^s U_k \right)^2 - \frac{2}{\pi} \left[\alpha_1 U_1^2 + \sum_{i=2}^s \alpha_j U_j \left(U_j + 2 \sum_{i=1}^{j-1} U_i \right) \right]}{\left(\sum_{k=1}^s U_k \cos \alpha_k \right)^2}} - 1. \quad (10)$$

В случае, когда высоты всех ступенек одинаковы, т. е. $U_1 = U_2 = \dots = U_s = U$, коэффициент гармоник определяется по формуле

$$k_r = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot \left[s^2 - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^s (2k-1) \alpha \right]}{\left(\sum_{k=1}^s \cos \alpha_k \right)^2}} - 1. \quad (11)$$

Тогда

$$k_r^2 = \left\{ \frac{\pi^2 \cdot \left[s^2 - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^s (2k-1) \alpha \right]}{\left(\sum_{k=1}^s \cos \alpha_k \right)^2} \right\} - 1. \quad (12)$$

Дифференцируя (12) для определения частных производных и приравнявая эти частные производные к нулю, получаем следующее обобщенное выражение:

$$\frac{\partial k_r^2}{\partial \alpha_p} = 0 \quad (13)$$

или

$$(2p-1) \sum_{k=1}^s \cos \alpha_k + \left[2 \sum_{k=1}^s (2k-1) \alpha_k - \pi s^2 \right] \sin \alpha_p = 0, \quad (14)$$

где $p = 1, 2, \dots, s$.

Таким образом, для минимизации коэффициента гармоник ступенчатого выходного напряжения инвертора необходимо определить s углов переключения ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$) основной гармоники выходного напряжения. На второй четверти периода углы переключения определяются как $\pi - \alpha_i$ ($i = 1, 2, \dots, s$). Величины этих s углов переключения должны также удовлетворять условию (7). Для нахождения углов переключения необходимо сформировать систему нелинейных уравнений на основе (14) и решить ее с помощью метода Ньютона—Рафсона либо другим численным методом.

Сравнение методов ОФСН и ОКМГ

Для анализа качества спектрального состава напряжений, формируемых с помощью обоих способов, существуют несколько показателей. Одним из показателей является коэффициент гармоник — наиболее популярный показатель качества выходного напряжения преобразователей. С его помощью количественно оценивается спектральный состав гармоник несинусоидальных выходных напряжений преобразователей.

В качестве базового критерия качества принят коэффициент гармоник, рассчитанный с помощью программы *MATLAB*.

Результаты анализа

Результаты аналитических вычислений углов переключения можно получить, используя программы, реализующие численные методы решения си-

стем нелинейных уравнений. Например, для пяти-уровневого напряжения получены следующие углы переключений:

- для оптимизации коэффициента гармоник: $\alpha_1 = 13,761^\circ$ и $\alpha_2 = 44,8428^\circ$ (рис. 4,а);

- для исключения третьей гармоники: $\alpha_1 = 15,9562^\circ$ и $\alpha_2 = 44,0438^\circ$ (рис. 5,а).

Начальные участки спектральных составов напряжений ОФСН и ОМКГ показаны на рис. 4,б и 5,б соответственно.

Для сравнения двух стратегий модуляции коэффициенты гармоник сравнивались при одинаковых условиях ($M = \text{const}$). Сначала вычислим коэффициенты гармоник выходных напряжений многокаскадных инверторов (с различным числом ступенек), сформированных на основе рассчитанных углов переключений при способах ОМКГ и ОФСН. Зависимость коэффициента гармоник для выходных напряжений, формируемых с помощью обоих способов, от числа ступенек приведена в табл. 1.

Значения коэффициентов гармоник для обоих случаев определены по формуле по формуле

$$k_r = \frac{\sum_{q=3, 5, \dots}^{201} \sqrt{\frac{1}{q} \left[\sum_{i=1}^s \cos(q\alpha_i) \right]^2}}{\sum_{i=1}^s \cos(\alpha_i)} \frac{1}{q}. \quad (15)$$

Из табл. 1 видно, что увеличение числа углов переключений (ступенек) выходного напряжения приводит к снижению коэффициента гармоник и для обеспечения его синусоидальной формы требуются меньшие затраты на фильтрацию. Из результатов, приведенных в табл. 1, видно улучшение, полученное с помощью способа ОМКГ, по сравнению с ОФСН, за счет уменьшения коэффициента гармоник. Положительная динамика уменьшения

Таблица 1

Число углов переключений за $\pi/2$	Коэффициент гармоник, %	
	ОМКГ	ОФСН
$s = 2$	16,70	16,40
$s = 3$	11,58	14,32
$s = 4$	08,89	09,70
$s = 5$	07,21	08,19

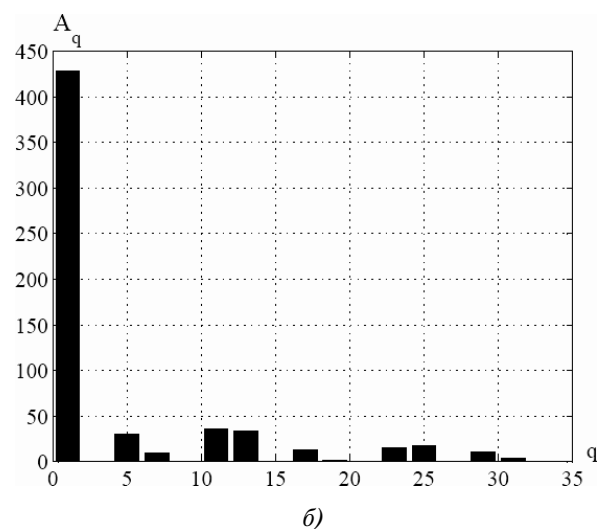
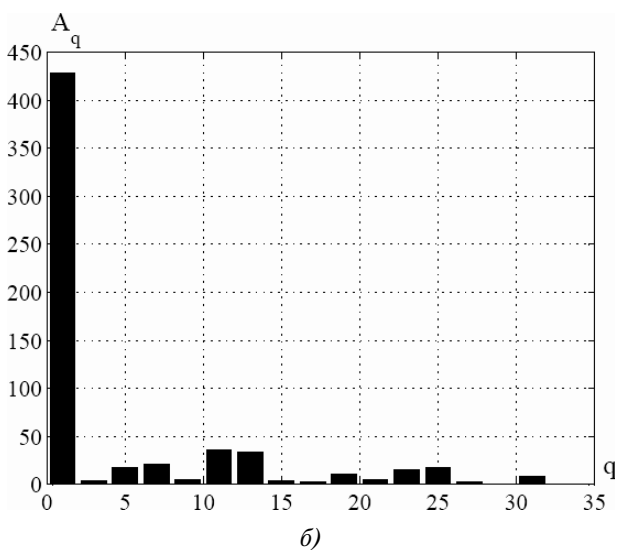
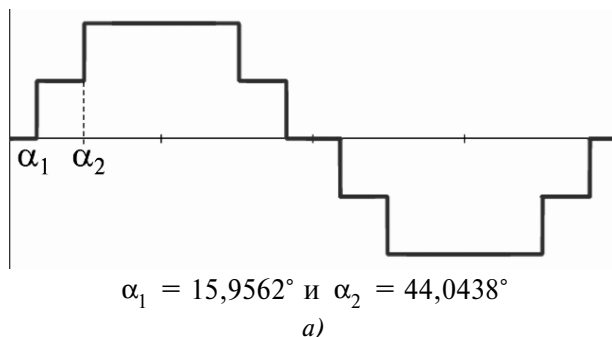
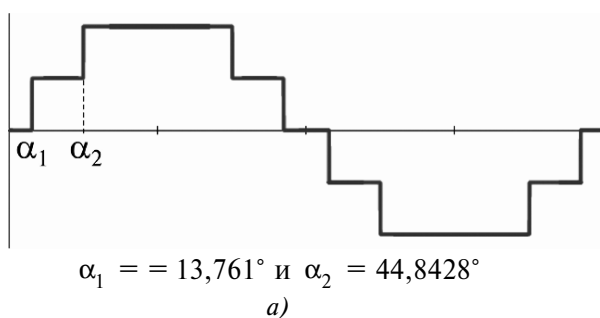


Рис. 4. Форма напряжения для способа ОМКГ (а) и его спектральный состав (б)

Рис. 5. Форма напряжения для способа ОФСН (а) и его спектральный состав (б)

коэффициента гармоник для различного числа ступенек выходного напряжения (углов переключения) приведена в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что для минимизации коэффициента гармоник выходного напряжения инвертора предпочтительно применять способ ОМКГ. Однако только коэффициента гармоник недостаточно, поскольку это не единственный критерий сравнения многоимпульсных напряжений. Результаты необходимо оценивать с точки зрения остав-

Число углов переключений за $\pi/2$	Улучшение ОМКГ по сравнению с ОФСН, %
$s = 2$	01,80
$s = 3$	19,13
$s = 4$	08,35
$s = 5$	11,97

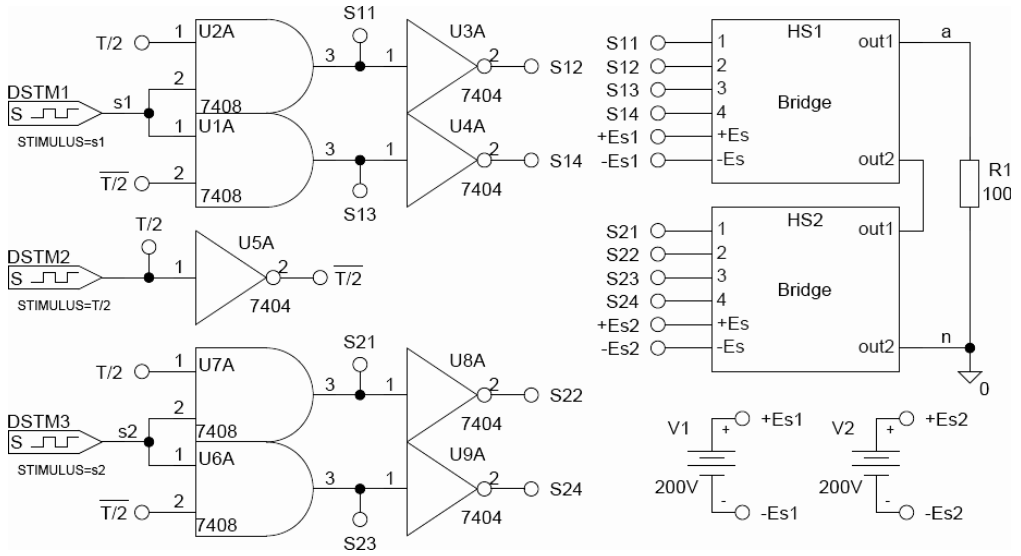


Рис. 6. Схема модели инвертора со ступенчатым выходным напряжением

шихся неисключенных гармоник, особенно низших из высших [3].

Преимущество способа ОМКГ с точки зрения коэффициента гармоник обеспечено, к сожалению, в ущерб номеру первой низшей из высших неисключенных гармоник, что всегда можно обеспечить с помощью способа ОФСН. В качестве примера для пояснения с помощью программы *OrCAD* рассчитаны спектральные составы обоих напряжений. Схема модели инвертора, позволяющего реализовать эти напряжения (ОМКГ ОФСН) с помощью двух мостовых коммутаторов, показана на рис. 6, а сигналы управления и выходное напряжение инвертора — на рис. 7.

Основные параметры обоих инверторов:

- полное напряжение питания 400 В. Таким образом, напряжение питания каждого мостового коммутатора составляет 200 В;
- частота выходного напряжения 50 Гц.

Результаты гармонического анализа выходных напряжений обоих инверторов с помощью программы *OrCAD* показаны на рис. 8. Полученные при моделировании коэффициенты гармоник отличаются от расчетных, поскольку при расчете спект-

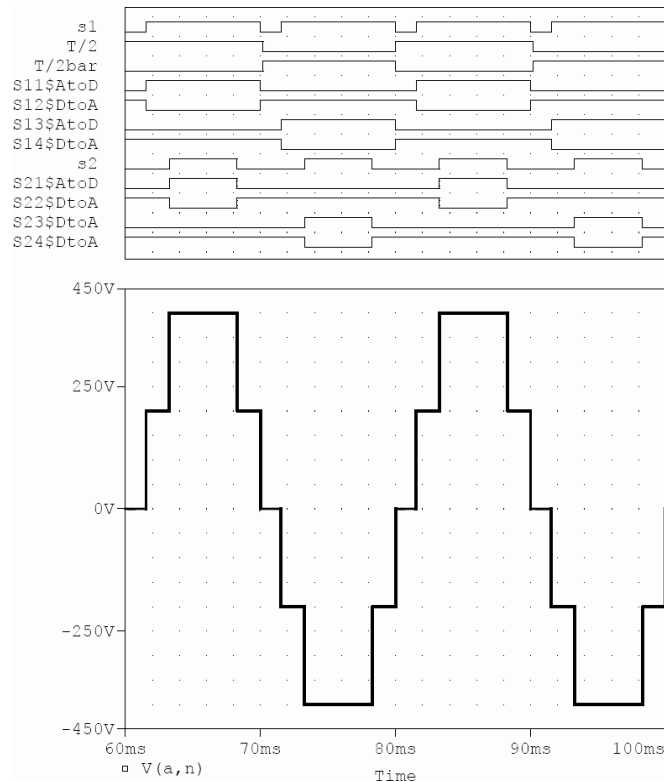
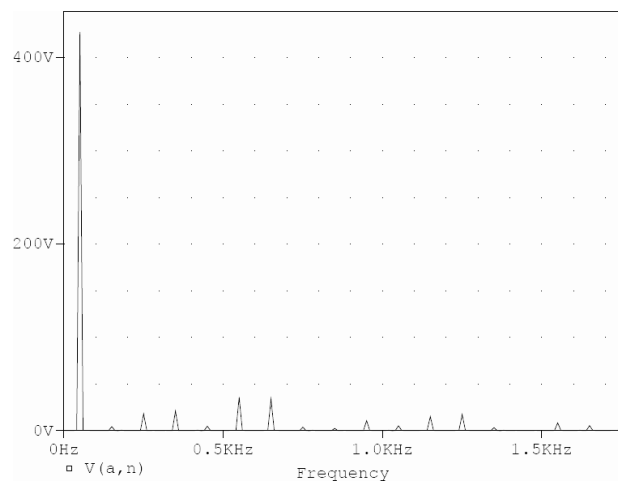
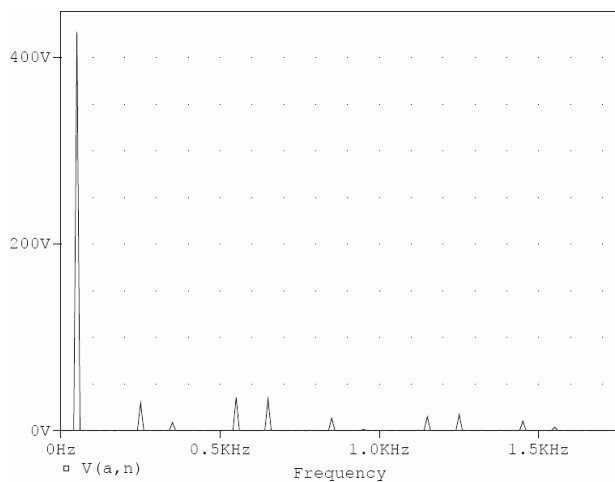


Рис. 7. Сигналы управления и выходное напряжение инвертора



TOTAL HARMONIC DISTORTION =
= 1.612864E+01 PERCENT

a)



TOTAL HARMONIC DISTORTION =
= 1.644082E+01 PERCENT

б)

Рис. 8. Спектральный состав ступенчатых напряжений, сформированных с помощью способов ОМКГ (а) и ОФСН (б)

рального состава (*Fourier Analysis*) учитываются только сто гармоник.

Сравнение двух частотных спектров на рис. 4, б, 5, б и 8 показывает, что способ ОФСН позволяет исключить третью и кратные им гармоники, тогда как способ ОМКГ позволяет существенно снизить их амплитуды.

В то же время амплитуда пятой гармоники — первой неисключенной при способе ОФСН — больше, чем в случае использования способа ОМКГ.

Для обобщения проведенных исследований и подтверждения полученных теоретических результатов было проведено моделирование еще ряда инверторов с большим числом ступеней выходного напряжения. Результаты моделирования показали, что:

- амплитуды гармоник, исключенных при использовании способа ОФСН, существенно уменьшаются при увеличении числа ступенек выходного напряжения при использовании способа ОМКГ. При этом расчеты показали, что величины этих амплитуд составляют не более 3% относительно величины основной гармоники. При дальнейшем увеличении числа ступенек выходного напряжения эти амплитуды становятся пренебрежимо малыми и устремляются к нулю;

- амплитуда первой неисключенной гармоники, содержащейся в спектре выходного напряжения инвертора при использовании способа ОФСН, выше, чем амплитуда гармоники с тем же номером при использовании способа ОМКГ.

Результаты моделирования с достаточной степенью точности подтверждают полученные теоре-

тические результаты. Полученные результаты показывают, что способ ОМКГ позволяет получить лучший спектральный состав выходного напряжения, особенно с точки зрения коэффициента гармоник, по сравнению со способом ОФСН. Однако в [9—11] показано, что основным недостатком использования способа ОМКГ является невозможность регулирования амплитуды основной гармоники (постоянный индекс модуляции).

Выводы

Если основным критерием является минимальное содержание высших гармоник в выходном напряжении, то предпочтительным оказывается способ минимизации коэффициента гармоник (ОМКГ). Исследования, проведенные на основе сравнения двух способов формирования ступенчатых выходных напряжений инвертора, показали, что в этом случае способ ОМКГ предпочтительнее и представляет особый интерес. Показано, что способ достаточно полезен, поскольку дает возможность снижать коэффициент гармоник с повышенной точностью при увеличении числа ступенек выходного напряжения. Таким образом, по мере снижения содержания высших гармоник ступенчатое напряжение приближается к желаемой синусоидальной форме.

Тем не менее преимущество, полученное с точки зрения коэффициента гармоник, уменьшается за счет того, что полностью низшие из высших гармоник не исключаются. Однако, несмотря на их наличие в спектре напряжения, амплитуды этих гармоник составляют не более 3% относительно

амплитуды основной гармоники, особенно при увеличении числа ступенек выходного напряжения, т. е. числа углов переключений. Если их число достаточно велико, амплитуды этих гармоник можно считать пренебрежимо малыми. Таким образом, этим критерием сравнения можно пренебречь.

Несмотря на все эти преимущества, способ ОМКГ по сравнению со способом ОФСН имеет один существенный недостаток — невозможность регулирования амплитуды основной гармоники.

Библиографический список

1. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. — М.: Энергия, 1969.

2. Малышков Г.М. Способы аппроксимации синусоидального напряжения дискретными // Электронная техника в автоматике: Сб. статей; Вып. 16 / Под ред. Ю. И. Конева. М.: Радио и связь, 1985. С. 116-126.

3. Малышков Г.М. Коэффициент режекции гармоники // Электронная техника в автоматике: Сб. статей. Вып. 14 / Под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1983. С. 162-169.

4. Krishnamurthy K. A., Manajani S. B., Revankar G. N. and Dubey G. K. Selective Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Pulsewidth Modulated Inverters. — International J. Electron, 1979, v. 6, No 3, pp. 321-330.

5. A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. — IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-17, No. 5, Sep/Oct 1981.

6. G.R. Walker. Modulation and control of Multilevel converters. — Doctorat thesis of Queensland University, November 1999.

7. Y. Sahali and M. K. Fellah. Optimized Harmonic Stepped Waveform OHSW technique for Multilevel Cascaded Inverters Control. — International Conference on Electrical and Electronics Engineering ICEEE'2004, April 24-26, 2004.

8. Y. Sahali and M. K. Fellah. Optimized Harmonic Stepped Waveform OHSW technique for Multilevel

Cascaded Inverters Control. — International Conference on Electrical, Electronics Engineering, Communication & Physical Systems, University of Saida, May 4-5, 2004.

9. Y. Sahali and M. K. Fellah. New Approach for the Symmetrical Multilevel Inverters Control: Optimal Minimization of the Total Harmonic Distorsion (OMTHD technique. — International Symposium on Industrial Electronics IEEEISIE' 04, Ajaccio, France, 4-7 May 2004.

10. Y. Sahali and M. K. Fellah. Optimal Minimization of the Total Harmonic Distortion (OMTHD) technique for the Symmetrical Multilevel Inverters Control. — First National Conference on Electrical Engineering and its Applications CNEA'04, Sidi-Bel-Abbes, May 24-25, 2004.

11. F. Z. Peng and J. S. Lai. Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverters. — IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, May/June 1997.

12. F.Z. Peng, J.S. Lai, J.W. Mckeever and J. Vancoevering. A Multilevel Voltage-Source Inverter With Separate DC Sources for Static Var Generation. — IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 5, Sep./Oct. 1996.

13. F. Z. Peng, J. W. Mckeever and D. J. Adams. A Power Line Conditioner Using Cascade Multilevel Inverters for Distribution Systems. — IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 6, Nov./Dec. 1998.

14. Y. Sahali and M. K. Fellah. Selective Harmonic Eliminated Pulse-Width Modulation Technique (SHE PWM) applied to Three-level Inverter/Converter. — International Symposium on Industrial Electronics IEEE-ISIE'03, Vol. 2, Rio de Janeiro, Brasil, 9-11 June 2003, pp.1112-1117.

15. L.M. Tolbert, F.Z. Peng, T. Cunningham and J.N. Chiasson. Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles. — Special Section on Multilevel Inverters II, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.49, No.5, October 2002.

Московский авиационный институт
(государственный технический университет)