

УДК 621.314.1

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.14

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО КВАЗИСИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В МОСТОВОМ ИНВЕРТОРЕ

В. И. КОЛОСОВ*, **Е. В. ВАСЕЧКО**

научно-производственное предприятие «Импульс», Запорожье, УКРАИНА
*email: kvi@pulse.zp.ua

АННОТАЦИЯ Исследована возможность снижения уровня высших гармоник в спектре и улучшения формы выходного квазисинусоидального напряжения в мостовом инверторе путём деформации кривой формы фронтов трапецеидального напряжения полумостовых преобразователей. Предложено обобщенное аналитическое выражение функции формы фронтов трапецеидального напряжения, обладающее способностью видоизменения функции параметром деформации. Проведен анализ влияния параметра деформации и длительности фронтов на условия селективного подавления гармоник, ближайших к основной. Определено оптимальное сочетание значений этих параметров, позволяющее достичь полного подавления высших гармоник и формирования теоретически идеальной синусоидальной формы в выходном напряжении инвертора. Приведены графические зависимости, позволяющие найти компромисс между спектральным составом выходного напряжения инвертора и динамическими потерями в элементах коммутации. Теоретический анализ подтвержден результатами экспериментальной проверки.

Ключевые слова: качество электропитания; мостовой инвертор; квазисинусоидальное напряжение; широтно-импульсная модуляция; полумостовой преобразователь.

IMPROVING THE QUALITY OF THE OUTPUT QUASI-SINUSOIDAL VOLTAGE IN A BRIDGE INVERTER

V. KOLOSOV, E. VASECHKO

scientifically manufacturing enterprise "Impuls", Zaporozhye, UKRAINE

ABSTRACT The possibility of decreasing the level of higher harmonics in the spectrum and improving the shape of the output quasi-sinusoidal voltage in a bridge inverter by deforming the shape curve of the trapezoidal voltage fronts of half-bridge converters is investigated. A generalized analytical expression for the function of the shape of the trapezoidal stress fronts is proposed, which has the ability to modify the function by the strain parameter. The influence of the deformation parameter and the duration of the fronts on the conditions for selective suppression of harmonics closest to the fundamental are analyzed. An optimal combination of the values of these parameters is determined, which makes it possible to achieve complete suppression of the higher harmonics and the formation of a theoretically ideal sinusoidal form in the output voltage of the inverter. Graphic dependencies are given that allow finding a compromise between the spectral composition of the output voltage of the inverter and the dynamic losses in the switching elements. The theoretical analysis is confirmed by the results of experimental verification. The theoretical results were verified experimentally on the layout of a bridge inverter with an output power of 1 kW. With a sinusoidal form of trapezoidal stress fronts with front edge duration of 0.94 radians, the minimum harmonic coefficient was 2.1%. In the transition to the optimally deformed shape of the fronts with a strain parameter of $\pi/6$ and a front duration of 1.05 radians, the harmonic level decreased to 0.8%.

Keywords: power quality; bridge inverter; quasi-sinusoidal voltage; pulse-width modulation; half-bridge converter.

Введение

Одним из направлений повышения энергоэффективности преобразовательной техники является использование несинусоидальных форм выходного напряжения, которые позволяют снизить мощность динамических потерь в элементах коммутации [1, 2]. При этом важно выполнять требование нормативного документа, определяющего качество электрической энергии [3], и допускать к использованию только такие квазисинусоидальные формы, в которых коэффициент искажения синусоидальности не превышает установленные

нормы, и соблюдаются ограничения на уровень амплитуд низших из высших гармоник спектрального состава.

В последнее время широко предлагается трапецеидальный закон с линейной формой фронтов, а также инжекция третьей гармоники при формировании выходного напряжения в однофазных мостовых инверторах [4-9]. Исследуются также более сложные (модифицированные) законы модуляции, состоящие из комбинации отрезков прямых линий и синусоид, или из отрезков прямых и кривых особой закономерности, обеспечивающих в совокупности получение квазисинусоидальной формы напряжения

[1, 2]. Однако, их применение ограничивается либо трудностями по выполнению требований стандарта [3], либо сложностью выполнения математических вычислений в процессорном оборудовании.

В работе [10] предложен способ формирования квазисинусоидального напряжения в мостовом инверторе в виде разности двух трапецеидальных напряжений полумостовых преобразователей, отличающийся от существующих следующими положительными качествами:

- сохранением коэффициента использования напряжения питания на уровне, близком к единице;
- снижением мощности динамических потерь в элементах коммутации и потерь при фильтрации;
- минимизацией амплитуд низших из высших гармоник спектрального состава выходного напряжения;
- простотой формирования закона модуляции, не требующего сложных и длительных вычислительных процедур;
- равномерной загрузкой ключевых элементов токами коммутации.

Теоретический анализ спектрально-энергетических характеристик способа приведен авторами в работе [11], где определены рабочая область и оптимальные значения длительности фронтов при ШИМ по трапецеидальному закону с синусоидальной функцией формы фронтов из условия селективного подавления гармоник, ближайших к основной.

Последующие теоретические исследования показали, что синусоидальная функция формы фронтов не является оптимальной по содержанию высших гармоник в спектральном составе квазисинусоидального напряжения мостового инвертора.

Цель работы

Целью работы является развитие способа [10] в направлении повышения качества выходного квазисинусоидального напряжения инвертора. Исследование состоит в поиске функции формы фронтов трапецеидального напряжения полумостовых преобразователей, которая способна обеспечить частичное или полное селективное подавление высших гармоник выходного напряжения инвертора без ухудшения энергетических характеристик.

Изложение основного материала

Краткое описание способа. Предложенный способ [10] состоит в следующем. В мостовом инверторе (рис.1) напряжение от каждого полумостового преобразователя А и В формируют путём преобразования постоянного напряжения питания в ШИМ последовательность.

Каждую из последовательностей модулируют идентичными сигналами управления по закону знакопеременной трапеции с заданной функцией формы фронтов. Фазы сигналов управления полумостовыми преобразователями сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/3$ радиан. Переключения в ключах полумостовых преобразователей выполняются только на интервалах формирования фронтов, а на стадии формирования вершин ключи находятся в одном из статических состояний, что в совокупности образует режим прерывистой или частичной модуляции. Из каждой ШИМ последовательности выделяют посредством фильтрации трапецеидальное напряжение огибающей, которое соответствует закону модуляции. Выходное квазисинусоидальное напряжение мостового инвертора формируется в виде разности двух трапецеидальных напряжений от полумостовых преобразователей.

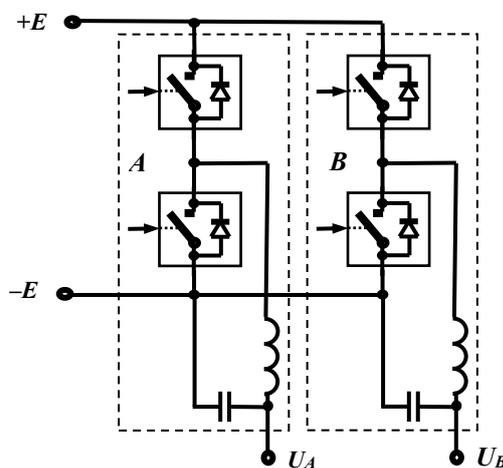


Рис. 1 – Мостовой инвертор: А, В – полумостовые преобразователи.

На рис. 2 показаны (диаграммы U_A , U_B) промодулированные по заданному закону ШИМ последовательности на выходах коммутаторов полумостовых преобразователей и соответствующие им огибающие трапецеидальных выходных напряжений после фильтрации.

Здесь же приведена (диаграмма U_{AB}) форма разностного выходного квазисинусоидального напряжения.

Все диаграммы изображены для наглядности при длительности фронтов $\alpha=\pi/3$ радиан.

Выбор функции изменяемой формы фронтов. Для анализа вместо синусоидальной функции формы фронтов предложено обобщенное тригонометрическое выражение, обладающее возможностью деформации функции:

$$y(x) = a \cdot \sin\left(b \cdot \frac{x}{\alpha} \cdot \frac{\pi}{2} + \theta\right) + c \quad (1)$$

где a, b, c – коэффициенты функции;
 θ – варьируемый угол сдвига, радиан;
 α – длительность фронта, радиан.

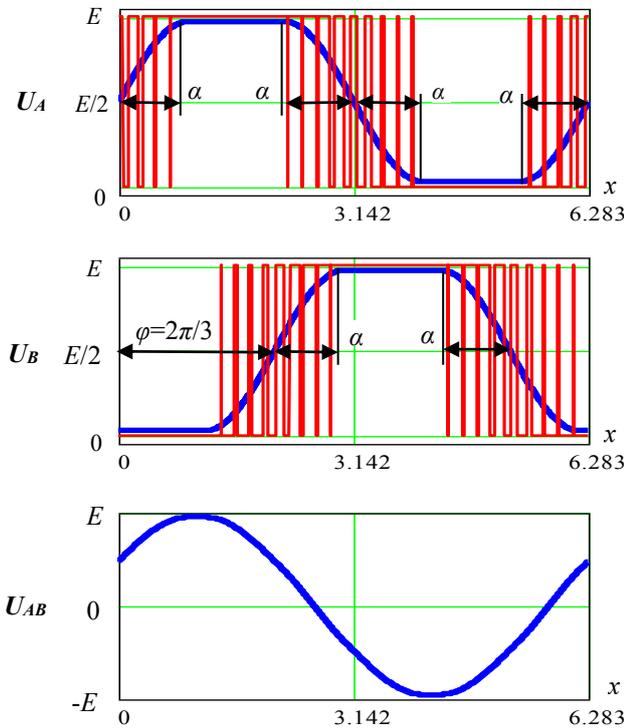


Рис. 2 – Формы выходных напряжений: U_A, U_B – полумостовых преобразователей до и после фильтрации; U_{AB} – мостового инвертора

Определим три характерные значения функции

(1) в точках:

1. $y(x)=0$ при $x=0$ - функция равна 0 в начале формирования фронта;
2. $y(x)=1$ при $x=\alpha$ - функция равна 1 в конце формирования фронта;
3. $d[y(x)]/dx=0$ при $x=\alpha$ - производная функции равна 0 в конце формирования фронта.

На основании этих значений составим систему из трёх уравнений (2), решая которую выразим коэффициенты a, b, c функции (1) через угол сдвига θ :

$$a \cdot \sin \theta + c = 0; \quad a \cdot \sin \left(b \cdot \frac{\pi}{2} + \theta \right) + c = 1;$$

$$\frac{a \cdot b \cdot \pi \cdot \cos \left(b \cdot \frac{\pi}{2} + \theta \right)}{2 \cdot \alpha} = 0. \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{1 - \sin \theta}; \quad c = \frac{-\sin \theta}{1 - \sin \theta}; \quad b = \frac{\pi - 2 \cdot \theta}{\pi}. \quad (3)$$

При подстановке выражений коэффициентов (3) в формулу (1) получим функцию изменяемой формы фронта, которая зависит только от двух параметров - длительности фронта α и варьируемого угла сдвига θ .

На рис.3 показан полувольтный отрезок трапецидального напряжения с функцией формы фронтов по выражению (1) с коэффициентами (3), где иллюстрируется влияние вариации угла сдвига θ на деформацию фронтов. При $\theta=0$ коэффициенты (3) принимают значения $a=1; b=1; c=0$ и функция (1) вырождается в идеально синусоидальную. При $-\pi/2 \leq \theta < 0$ функция (1) приобретает графически вогнутый, а при $0 < \theta < \pi/2$ выпуклый характер относительно синусоидальной формы.

Таким образом, определена аналитическая модель варьируемой формы фронтов с параметром деформации θ , который, как будет показано далее, позволит регулировать спектральный состав трапецидальных и квазисинусоидального напряжений.

Спектральные характеристики. Гладкие формы трапецидального напряжения с функцией формы фронта (1) на выходе фильтров полумостовых преобразователей с напряжением питания E на интервале $x=(0 \dots \pi/2)$ описываются выражением:

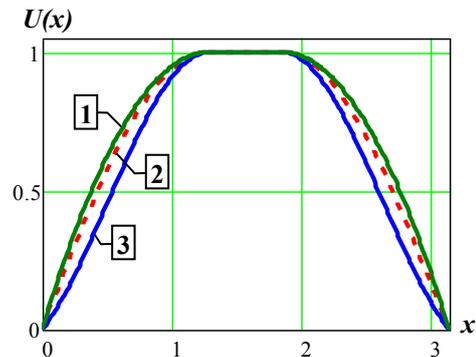


Рис. 3 – Форма полувольтного отрезка трапецидального напряжения при разных значениях параметра деформации фронта θ : 1. $\theta=1,57$; 2. $\theta=0$; 3. $\theta=-1$

$$U(x) = \begin{cases} \frac{E}{2} \cdot \left[a \cdot \sin \left(b \cdot \frac{x}{\alpha} \cdot \frac{\pi}{2} + \theta \right) + c \right], & \text{если } 0 \leq x \leq \alpha; \\ \frac{E}{2}, & \text{если } \alpha \leq x \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Длительность фронтов α может варьироваться от значения $\alpha=0$, при котором плоская часть вершины присутствует на всём интервале полувольты (то есть в пределах $0 \dots \pi$) и форма становится прямоугольной, до $\alpha=\pi/2$, при котором вершина стягивается в точку и трапецидальная форма напряжения превращается в гладкую.

В связи с полувольтной и четвертьволновой симметрией формы напряжения (4) при разложении в ряд Фурье получаем коэффициенты только для нечетных членов ряда:

$$B_k = \frac{2 \cdot E}{\pi \cdot n} \cdot \frac{(\pi - 2\theta)^2 \cdot (\sin \theta - \cos \alpha \cdot n)}{(\sin \theta - 1) \cdot [(\pi - 2\theta)^2 - 4(n \cdot \alpha)^2]} \quad (5)$$

где: $n=2k-1$ – номер нечётной гармоники;
 $k=1,2,3,\dots$ - порядковый номер члена ряда.

В выражении (5) условием подавления высших гармоник ($n>1$) при наличии основной гармоники ($n=1$) является равенство $B_k=0$, что выполняется очевидным равенством сомножителя из числителя:

$$\sin \theta - \cos \alpha \cdot n = 0 \quad (6)$$

В данном уравнении присутствуют два изменяемых параметра θ и α , что предоставляет возможность подавления не только одной n -ой гармоники, но и совместное подавление двух и более гармоник при определённом сочетании значений этих параметров. Нахождение значений θ и α выполняется путём решения системы уравнений, составленных по выражению (6) с требуемыми номерами подавляемых гармоник.

Наиболее интересный результат получен в одном частном случае, когда при сочетании значений $\theta=\pi/6$ и $\alpha=\pi/3$, одновременно подавляются все нечетные высшие гармоники, за исключением 3-й и кратных трём. При таком сочетании коэффициенты (3) принимают значения: $a=2$; $b=2/3$; $c=-1$, а функция формы фронта (1) и выражение членов ряда (5) приобретают, соответственно, упрощенный вид:

$$y(x) = 2 \cdot \sin\left(x + \frac{\pi}{6}\right) - 1 \quad (7)$$

$$B_k = \frac{2 \cdot E \left[1 - 2 \cos(\pi \cdot n / 3)\right]}{\pi \cdot n (n^2 - 1)} \quad (8)$$

Номера подавляемых гармоник при равенстве 0 числителя (8) вследствие периодичности функции косинуса определяются: $n=6m\pm 1$, где $m=1,2,3,\dots$

На рис.4,5 представлены, соответственно, форма и спектр гармоник трапецидального напряжения ($E=1$) с использованием выражений (7),(8) которое содержит только основную гармонику и высшие нечётные гармоники кратные трём.

Найденное сочетание значений $\theta=\pi/6$ и $\alpha=\pi/3$, которое назовём оптимальным, интересно тем, что при условии дополнительного подавления 3-й и кратных ей нечетных гармоник открывается возможность формирования идеального синусоидального напряжения на основе трапецидального (несинусоидального).

Реализовать такую возможность удобно в соответствии с предложенным способом [10], то есть путем формирования разности двух периодических трапецидальных напряжения (рис. 2) от полумостовых преобразователей (рис. 1) сдвинутых на угол $\varphi=2\pi/3$ и представленных в виде суммы гармоник:

$$U_{AB}(x) = U_A(x) - U_B(x) = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \left\{ \sin(n \cdot x) - \sin[n \cdot (x - \varphi)] \right\} \quad (9)$$

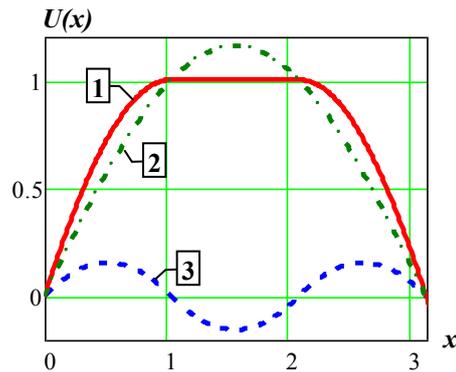


Рис. 4 – Форма полуволны напряжения полумостовых преобразователей и её составляющие: 1 - трапеция с оптимальными параметрами формы фронтов $\theta=\pi/6$ и $\alpha=\pi/3$; 2 - основная гармоника; 3 - суммарное напряжение нечётных гармоник кратных трём

В результате преобразования разности синусных функций в выражении (9) получим:

$$U_{AB}(x) = \sum_{k=1}^{\infty} 2B_k \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{3}\right) \cdot \cos\left[n \cdot \left(x - \frac{\pi}{3}\right)\right] \quad (10)$$

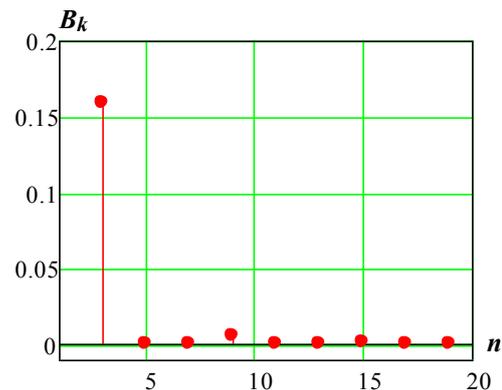


Рис. 5 – Спектр высших гармоник трапецидального напряжения с оптимальными параметрами формы фронтов $\theta=\pi/6$ и $\alpha=\pi/3$

Отсюда коэффициенты ряда Фурье выходного напряжения инвертора (10) с учетом выражения (8) при оптимальном сочетании $\theta=\pi/6$ и $\alpha=\pi/3$:

$$B_{opt.AB} = \frac{4 \cdot E \left[1 - 2 \cos(\pi \cdot n / 3)\right]}{\pi \cdot n (n^2 - 1)} \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{3}\right) \quad (11)$$

Здесь $B_{opt.AB}=1$ ($E=1$) только для одного значения $n=1$, а для всех остальных нечётных $n>1$ значение $B_{opt.AB}=0$, что подтверждает совпадение данного спектра со спектром идеальной синусоидальной формы.

Влияние длительности фронтов. Изменение длительности фронтов трапецидального напряжения полумостовых преобразователей влияет на

гармонический состав разностного выходного напряжения инвертора [11]. Поэтому представляет интерес анализ такого влияния на коэффициент гармоник выходного напряжения в условиях вариации параметра формы фронтов θ .

Приведём формулу коэффициентов ряда (5) для разностного выходного напряжения инвертора (10) к виду, при котором параметр деформации θ и длительность фронтов α являются переменными:

$$B_{k.AB} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot n} \cdot \frac{(\pi - 2\theta)^2 \cdot (\sin \theta - \cos \alpha \cdot n)}{(\sin \theta - 1) \cdot [(\pi - 2\theta)^2 - 4(n \cdot \alpha)^2]} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{3}\right) \quad (12)$$

Отсюда при $n=1$ получим зависимость амплитуды и квадрата действующего значения первой гармоники выходного напряжения инвертора от параметров θ и α :

$$U_{AB.1m} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot E}{\pi} \cdot \frac{(\pi - 2\theta)^2 \cdot (\sin \theta - \cos \alpha)}{(\sin \theta - 1) \cdot [(\pi - 2\theta)^2 - 4\alpha^2]} \quad (13)$$

$$U_{AB.1rms}^2 = \frac{6 \cdot E^2}{\pi^2} \cdot \left(\frac{(\pi - 2\theta)^2 \cdot (\sin \theta - \cos \alpha)}{(\sin \theta - 1) \cdot [(\pi - 2\theta)^2 - 4\alpha^2]} \right)^2 \quad (14)$$

Квадрат действующего значения суммы ($M > 100$) высших гармоник выходного напряжения инвертора U_{AB} получим, используя формулу коэффициентов ряда (12):

$$U_{AB.m.rms}^2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=2}^M (B_{k.AB})^2 \quad (15)$$

Наконец, коэффициент гармоник напряжения U_{AB} на выходе инвертора (рис.2) получим с использованием выражений (14),(15):

$$K_g = \sqrt{\frac{U_{AB.m.rms}^2}{U_{AB.1rms}^2}} \quad (16)$$

На рис. 6 приведены графические зависимости коэффициента гармоник выходного напряжения инвертора по формуле (16) при разных значениях параметра деформации θ . Из графиков следует, что кривые имеют характерные точки с минимальными значениями коэффициента гармоник $K_{g.min}$ и соответствующими им значениями длительности фронтов α_{min} в области $\alpha \leq \pi/3$. Минимумы кривых коэффициента гармоник увеличиваются и смещаются в направлении меньших значений α при снижении параметра θ . Для снижения мощности динамических потерь в элементах коммутации желательно уменьшение длительности фронтов [11], однако при этом возрастает уровень высших гармоник, ближайших к основной. Наименьшее значение $K_{g.min}=0$ достигается при оптимальном сочетании

$\theta=\pi/6$ и $\alpha_{min}=\pi/3$, то есть при оптимально деформированной функции формы фронта (7).

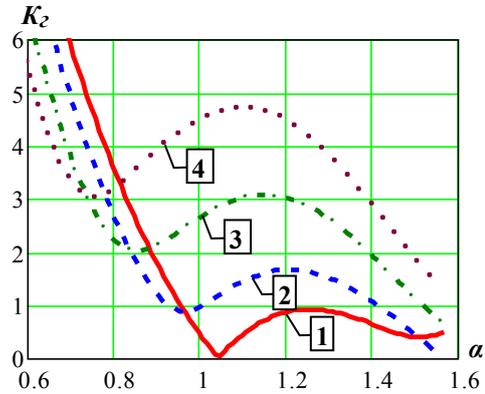


Рис. 6 – Влияние длительности фронтов с разной степенью их деформации на коэффициент гармоник выходного напряжения инвертора: 1. $\theta=\pi/6=0,524$, $K_{g.min}=0$ (оптимально деформированные); 2. $\theta=0$, $K_{g.min}=0,86\%$ (синусоидальные); 3. $\theta=-0,48$, $K_{g.min}=2\%$; 4. $\theta=-0,84$, $K_{g.min}=3\%$

На рис. 7 показано поведение кривых минимальных значений коэффициента гармоник $K_{g.min}$ и длительности фронтов α_{min} при изменении параметра деформации θ . Противоположность тенденций этих зависимостей требует нахождения компромисса между требованиями к этим параметрам. Поэтому графики предоставляют разработчику возможность осознанного выбора значения длительности фронтов в пользу либо полного подавления высших гармоник и формирования идеальной синусоидальной формы, либо снижения мощности динамических потерь в элементах коммутации при некотором допуске на значение коэффициента гармоник.

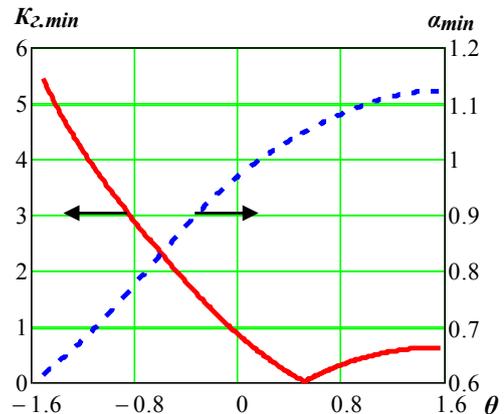


Рис. 7 – Влияние параметра деформации θ на минимальные значения коэффициента гармоник $K_{g.min}$ и соответствующие им значения длительности фронтов α_{min}

На рис. 8 показаны несколько форм выходного напряжения инвертора (смещенных для наглядности) при различных значениях параметров фронтов θ и α_{\min} . Они помогут определить значения параметров при визуальном выборе необходимой формы.

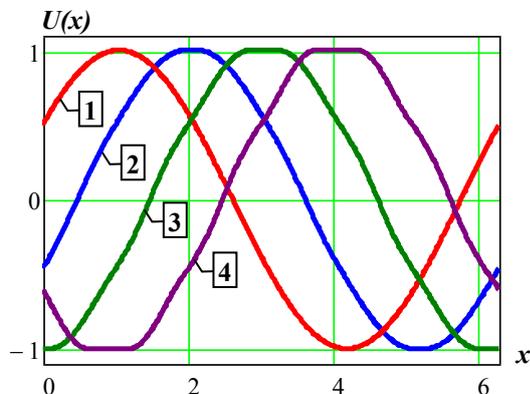


Рис. 8 – Видоизменение формы выходного напряжения инвертора при изменении параметров фронтов: 1. $\theta=\pi/6=0,524$, $\alpha_{\min}=\pi/3=1,05$, $K_{г.\min}=0$ (оптимально деформированные); 2. $\theta=0$, $\alpha_{\min}=0,97$, $K_{г.\min}=0,86\%$ (синусоидальные); 3. $\theta=-0,48$, $\alpha_{\min}=0,86$, $K_{г.\min}=2\%$; 4. $\theta=-0,84$, $\alpha_{\min}=0,76$, $K_{г.\min}=3\%$

На рис. 9 приведены для сравнения спектры высших гармоник, ближайших к основной, выходного напряжения инвертора при синусоидальной (отрезки с маркером) и оптимально деформированной (7) (точки) формах фронтов трапецеидальных напряжений. Здесь видна степень подавления парных гармоник при синусоидальной форме фронтов, которые расположены между нечетными гармониками кратными трем.

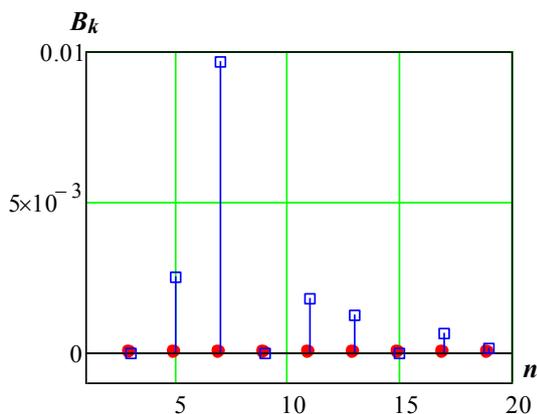


Рис. 9 – Спектры высших гармоник, ближайших к основной, выходного напряжения инвертора

Полученные теоретические результаты проверены экспериментально на макете мостового

инвертора с выходной мощностью 1 кВт. При синусоидальной форме фронтов трапецеидальных напряжений с длительностью фронтов $\alpha=0,94$ радиан минимальное значение коэффициента гармоник составило $K_{г.\min}=2,1\%$. При переходе к оптимально деформированной форме фронтов (7) с $\theta=0,524$ и $\alpha=1,05$ радиан уровень гармоник снижался до $0,8\%$.

Выводы

1. Определена возможность снижения уровня высших гармоник в спектре и улучшения формы выходного квазисинусоидального напряжения в мостовом инверторе путём деформации кривой формирования фронтов трапецеидального напряжения полумостовых преобразователей.

2. Предложено обобщенное аналитическое выражение функции формы фронтов трапецеидального напряжения, обладающее способностью видоизменения функции выведенным параметром деформации. Проведен анализ влияния параметра деформации и длительности фронтов на условия селективного подавления гармоник, ближайших к основной.

3. Определено оптимальное сочетание значений параметра деформации и длительности фронтов трапецеидального напряжения, позволяющее достичь полного подавления высших гармоник и формирования теоретически идеальной синусоидальной формы в выходном напряжении инвертора.

4. Приведены графические зависимости, позволяющие найти компромисс между спектральным составом выходного напряжения инвертора и динамическими потерями в элементах коммутации.

5. Теоретический анализ подтвержден результатами экспериментальной проверки.

Список литературы

1. Чубуков, К. А. Исследование и разработка вариантов ШИМ в трехфазных автономных инверторах напряжения с двигательной нагрузкой // Автореф. дисс., канд. техн. наук. – Чебоксары, 2010. – 23с.
2. Хухтиков, С. В. Исследование и разработка инверторов с ШИМ с пассивной фазой // Автореф. дисс., канд. техн. наук. – Москва, 2013. – 20 с.
3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. Пат. 67170 Україна МПК (2012.01) H02M7/00 Спосіб формування трапецеїдальної широтно-імпульсної напруги інвертора / Е. І. Скала, Д. А. Шокар'юв. – Бюл. № 3. – 2012.
5. Синчук, О. Н. К вопросу об анализе форм кривых тока и напряжения однофазного инвертора в

- функции способов модуляции / **О. Н. Синчук, С. Н. Бойко, А. В. Омельченко** // *Електротехніка і електромеханіка. Спец. вип. до XXII МНТК СЕЕ-2016*. – 2016. – №4(1). – Т. 1. – С. 107-113.
- Нрен, А.** An Improved SPWM-Based Control with Over-Modulation Strategy of the Third Harmonic Elimination for a Single-Phase Inverter / **А. Нрен, F. Mihalič** // *Energies*. –2018. – Vol.11. – p. 881. – doi:10.3390/en11040881.
 - Mihalič, F.** Third harmonic elimination by SPWM for filter reduction in a over-modulated single-phase inverter / **F. Mihalič, M. Milanović, A. Hren** // *Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*. – 2017. – pp. 37-45. – doi: 10.1109/EDPE.2017.8123253.
 - Vargas, F.** Highly efficient PWM strategy over FPGA / **F. Vargas, M. J. Meco, J. R. Heredia, A. Ruiz** // *Electronics Letters*. – 2008. – Vol. 44. – 24. – p. 1396-1398. – doi: 10.1049/el:20081697.
 - Patel, Mahesh A.** Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement / **Mahesh A. Patel, Ankit R. Patel, Dhaval R. Vyas, Ketul M. Patel** // *International Journal of Recent Trends in Engineering*. – Vol. 1. – 4. – 2009. – pp. 99-102.
 - Пат. 120400** Україна, МПК H02M 7/53 (2006.01). Спосіб формування квазисинусоїдальної вихідної напруги у мостовому інверторі / **В. І. Колосов**. – Бюл. №. 20. – 2017.
 - Колосов, В.И.** Формирование квазисинусоидального напряжения в мостовых инверторах / **В. И. Колосов, Е.В. Васечко** // *Проблемы автоматизированного электропривода. Силовая электроника и энергоэффективность. Вестник НТУ «ХПИ»*. – Харьков, 2017. – Вып. 27(1249). – С.318-323.
 - GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tehniceskikh sredstv. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric Energy. Compatibility of technical means. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems].
 - Pat. 67170 Ukraina MPK (2012.01) H02M7/00 Sposib formuvannia trapetseidальноi shyrotno-impulsnoi na-pruhuy invertora [Method of forming trapezoidal pulse width voltage inverter]. **E. I.Skala, D. A. Shokarov**, Biul. 3, 2012.
 - Sinchuk, O. N., Boyko, S. N., Omelchenko, A. V.** K voprosu ob analize form krivyih toka i napryazheniya odnofaznogo invertora v funktsii sposobov modulyatsii [To the question of analyzing the waveforms of current and single-phase inverter voltage modulation techniques function]. *Elektro-tehnika i elektromehanika. Spets. vip. do HHII MNTK SEE-2016*, 2016, 4(1), 1, 107-113.
 - Hren, A, Mihalič, F.** An Improved SPWM-Based Control with Over-Modulation Strategy of the Third Harmonic Elimination for a Single-Phase Inverter. *Energies*, 2018, 11, 881, doi:10.3390/en11040881
 - Mihalič, F., Milanović, M., Hren, A.** Third harmonic elimination by SPWM for filter reduction in a over-modulated single-phase inverter // *Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, 2017, 37-45, doi: 10.1109/EDPE.2017.8123253.
 - Vargas, F., Meco, M. J., Heredia, J. R., Ruiz, A.** Highly efficient PWM strategy over FPGA. *Electronics Letters*, 2008, 44, 24, 1396-1398, doi: 10.1049/el:20081697.
 - Mahesh, A. Patel, Ankit, R. Patel, Dhaval, R. Vyas, Ketul M. Patel.** Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2009, 1, 4, 99-102.
 - Pat. 120400 Ukraina, MPK H02M 7/53 (2006.01). Sposib formuvannia kvazisynusoidalnoi vykhidnoi napruhy u mo-stovomu invertori [Method of forming quasi-sinusoidal output voltage in the bridge inverter]. **V. I. Kolosov**, Biul. 20, 2017.
 - Kolosov, V. I., Vasechko, E. V.** Formirovanie kvazisinu-soidalnogo napryazheniya v mostovyih invertorah [Formation of quasi-sinusoidal voltage in bridge inverters]. *Pro-blemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda. Silovaya elektronika i energoeffektivnost. Tematicheskij vyipusk. – Vestnik NTU «HPI»*. Harkov, 2017, 27(1249), 318-323.

Bibliography (transliterated)

- Chubukov, K.A.**, Issledovanie i razrabotka variantov ShIM v trehfaznyih avtonomnyih invertorah napryazheniya s dvigatelnoy nagruzkoy [Research and development of PWM variants in three-phase autonomous voltage inverters with motor load]. *Avto-ref. diss., kand. tehn. Nauk*, Cheboksaryi, 2010, 23.
- Huhtikov, S. V.** Issledovanie i razrabotka invertorov s ShIM s passivnoy fazoy [Research and development of inverters with passive phase PWM]. *Avto-ref. diss., kand. tehn. nauk.*, M, 2013, 20.

Сведения об авторах (About authors)

Колосов Валерий Иванович – кандидат технических наук, научно-производственное предприятие «Импульс», технический директор, г. Запорожье, Украина; e-mail: kvi@pulse.zp.ua.

Valery Kolosov – Candidate of Technical Sciences, Scientifically manufacturing enterprise “Impuls”, Technical Director, Zaporozhye, Ukraine; e-mail: kvi@pulse.zp.ua.

Васечко Евгений Викторович – научно-производственное предприятие «Импульс», ведущий инженер, г.Запорожье, Украина; e-mail: john@pulse.zp.ua.

Evgen Vasechko – Scientifically manufacturing enterprise “Impuls”, Leading Engineer, Zaporozhye, Ukraine; e-mail: john@pulse.zp.ua.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Колосов, В. И. Повышение качества выходного квазисинусоидального напряжения в мостовом инверторе / **В. И. Колосов, Е. В. Васечко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 95-102. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.14.

Please cite this article as:

Kolosov, V., Vasechko, E. Improving the quality of the output quasi-sinusoidal voltage in a bridge inverter. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU"KhPI", 2018, **26**(1302), 1, 95-102, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.14.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Колосов, В. І. Підвищення якості вихідної квазисинусоїдальної напруги в мостовому інверторі / **В. І. Колосов, Є. В. Васечко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 95-102. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.14.

АНОТАЦІЯ Досліджено можливість зниження рівня вищих гармонік в спектрі і поліпшення форми вихідної квазисинусоїдальної напруги в мостовому інверторі шляхом деформації кривої форми фронтів трапецеїдальної напруги полумостових перетворювачів. Запропоновано узагальнений аналітичний вираз функції форми фронтів трапецеїдальної напруги, що володіє здатністю видозміни функції параметром деформації. Проведено аналіз впливу параметра деформації і тривалості фронтів на умови селективного придушення гармонік, найближчих до основної. Визначено оптимальне поєднання значень цих параметрів, що дозволяє досягти повного придушення вищих гармонік і формування теоретично ідеальної синусоїдальної форми в вихідній напрузі інвертора. Наведено графічні залежності, що дозволяють знайти компроміс між спектральним складом вихідної напруги інвертора і динамічними втратами в елементах комутації. Теоретичний аналіз підтверджений результатами експериментальної перевірки.

Ключові слова: якість електроживлення; мостовий інвертор; квазисинусоїдальна напруга; широтно-імпульсна модуляція; півмостовий перетворювач.

Поступила (received) 02.07.2018