

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МНОГОФАЗНОГО ИНВЕРТОРА С СИНУСОИДАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИЕЙ ВКЛЮЧЕНИЯ ЯЧЕЕК

Щетинин В.Е.* , Аверин С.В.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: shetininve@gmail.com*

*** e-mail: a_cb@mail.ru*

Проведен сравнительный спектральный анализ выходных напряжений разных способов формирования многоуровневого напряжения. Рассмотрены способы формирования многоуровневого напряжения, аппроксимирующего синусоидальное на выходе инвертора с многоканальным преобразованием. Предложен алгоритм управления ячейками инвертора, позволяющий сформировать выходное напряжение, по форме максимально приближенное к синусоидальной, при равномерной нагрузке ячеек инвертора.

Ключевые слова: источник вторичного электропитания, инвертор, алгоритм коммутации, многоканальное преобразование, спектральный анализ напряжения.

Введение

На борту летательного аппарата (ЛА) инвертор относится к вторичным источникам питания. В штатном режиме работы летательного аппарата питание нагрузок переменного тока осуществляется от системы электропитания переменного тока, содержащей генератор, работающий от маршевого двигателя. Однако, в случае отказа по какой-либо причине первичного источника питания, инвертор становится жизненно важным устройством, сохраняя работоспособность воздушного судна, поскольку обеспечивает питание бортовых систем напряжением заданного качества от бортового аккумулятора.

Так как для обеспечения высокого коэффициента полезного действия (КПД) транзисторы силового каскада инвертора работают в ключевом режиме, естественной формой выходного напряжения является последовательность прямоугольных импульсов. Такая форма напряжения применима только для резистивных нагрузок. Из принципа действия инвертора напряжения вытекает, что силовой каскад инвертора такого типа формирует на нагрузке последовательность импульсов прямоугольной формы, что в большинстве случаев нежелательно. Действительно, напряжение в форме прямоугольных импульсов имеет весьма малую длительность фронтов, что приводит к возникновению мощных

электромагнитных помех. Кроме того, наличие высших гармоник вызывает дополнительные потери в нагрузке, а также может вызывать другие нежелательные эффекты. Для ряда нагрузок переменного тока такая форма питающего напряжения или допустима (осветительные и нагревательные устройства), или приемлема (электродвигатели, обмотки электромагнитов, реле и т.п.), поскольку первые безразличны к роду тока, а вторые сами обладают фильтрующими свойствами вследствие индуктивного характера эквивалентного сопротивления.

Однако для большинства нагрузок переменного тока, например для сельсинов, поворотных трансформаторов, радио- и вычислительной техники требуется синусоидальное высококачественное напряжение, так как при наличии высших гармоник происходит существенное искажение характеристик этих устройств в режиме, когда амплитуда основной гармоники близка к нулю.

Синусоидальная форма выходного напряжения наиболее универсальна, она обеспечивает эффективную работу всех видов нагрузок переменного тока, а иногда становится целесообразной и для нагрузок постоянного тока, поскольку возможно обеспечение их коммутации силовыми ключами при токах, близких к нулю. Синусоидальная форма напряжения не содержит высокочастотных пульсаций радиопомех, что дает возможность исключить

фильтры потребителей и линий связи. Формирование синусоидального напряжения методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ) позволяет снизить массу и габаритные размеры фильтрующих узлов инвертора. При синусоидальной форме напряжения передача энергии по обычным проводным линиям не вызывает искажения формы напряжения.

В современных ЛА наблюдается тенденция к увеличению количества бортовых электронных и электрических систем, что влечет за собой рост мощности инверторов. Задача увеличения выходной мощности инвертора сама по себе требует нетривиальных подходов к ее решению. Решение этой задачи путем увеличения установленной мощности силовых ключей инвертора до требуемых значений при ограничениях, определяемых состоянием современной отечественной элементной базы силовых полупроводниковых приборов и тенденции к импортозамещению, невозможно. Известно [1, 2], что одним из способов увеличения выходной мощности инверторов является применение многопоточного преобразования. В этом случае суммируются мощности отдельных инверторов. Каждый из этих инверторов является ячейкой, работающей с определенным сдвигом фаз и входящей в состав многофазного инвертора. В связи с этим вопрос увеличения выходной мощности инверторов за счет использования многопоточного преобразования с

многофазной ШИМ вновь становится актуальной задачей.

Способы многоканального преобразования

Применение многоканального преобразования дает возможность сформировать многоуровневое выходное напряжение, по форме приближающееся к синусоидальному. Это позволит снизить частоту коммутации силовых ключей инвертора, уменьшив тем самым динамические потери и массу радиаторов.

Помимо формирования выходного напряжения с улучшенным спектральным составом, многоячеичность позволит уменьшить нагрузку на отдельные инверторы. Применение N-фазного регулятора выходного напряжения позволяет равномерно распределить ток по всем фазам, а следовательно, ток, одной фазы будет в N раз меньше тока нагрузки.

Идея многоканального преобразования не нова [1–3]. Наиболее известными методами формирования многоуровневого напряжения является равномерный сдвиг коммутации ячеек (рис. 1) и аппроксимируемый в трапецеидальную форму выходной сигнал (рис. 2). Также используется коммутация ячеек с нелинейным распределением по времени, которая не будет рассмотрена ввиду неравномерности нагрузок на отдельные ячейки инвертора.

Углы коммутации ключей инвертора при равномерном сдвиге рассчитываются по следующим формулам:

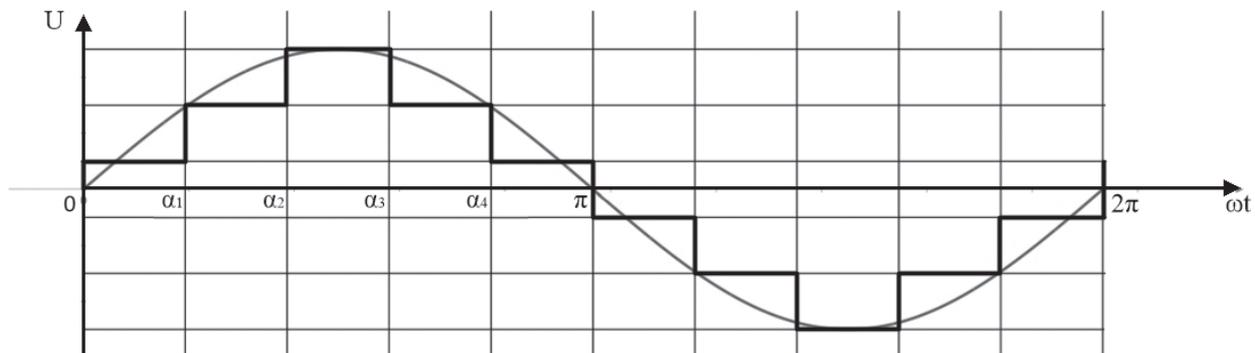


Рис. 1. Выходное напряжение инвертора с равномерным сдвигом включения ячеек

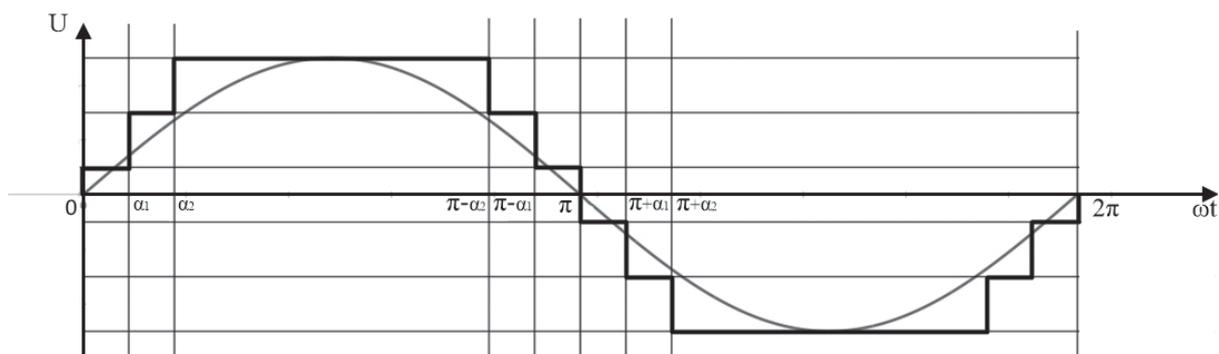


Рис. 2. Выходное напряжение инвертора при аппроксимации в трапецеидальную форму углов коммутации ячеек

$$\Delta\alpha = \frac{\pi}{N},$$

где N — число ячеек инвертора; α — угол сдвига момента включения ячеек инвертора,

$$\alpha_1 = \Delta\alpha, \alpha_i = \frac{i\pi}{N}, i = 1, \dots, N.$$

Результат расчета моментов включения ячеек и суммарный выходной сигнал инвертора при равномерном сдвиге показаны на рис. 3 и 4.

Для второго варианта алгоритма углы включения ключей инвертора задаются таким образом, чтобы получить аппроксимированное в трапециевидальную форму выходное напряжение. Углы коммутации в данном варианте рассчитываются по следующим формулам:

$$\Delta\alpha = \frac{2\text{ctg} \frac{\pi}{3}}{N-1},$$

$$\alpha_1 = \Delta\alpha, \alpha_i = i \frac{2\text{ctg} \frac{\pi}{3}}{N-1}.$$

Результаты расчета моментов включения ячеек и суммарный выходной сигнал инвертора при аппроксимации в трапециевидальную форму показаны на рис. 5 и 6.

Для обеспечения отказоустойчивости, упрощения конструкции и уменьшения массогабаритных

показателей целесообразно использовать одинаковые структуры ячеек для построения многоканальной структуры. Для управления моментами переключения ячеек необходимо обеспечить работу блока управления. Для этой цели наиболее целесообразно использовать микроконтроллер, который позволит формировать выходной сигнал заданной формы в нормальном режиме, а в случае выхода из строя какой-либо ячейки — пересчитать общую схему работы оставшихся ячеек. При этом сохранится работоспособность всего устройства при незначительном ухудшении формы выходного сигнала.

В статье предложен алгоритм коммутации силовых ключей инвертора с многопоточной структурой и проведен сравнительный анализ с двумя ранее известными методами.

Вариант с равномерным смещением по числу ячеек прост в реализации, но полученные результаты становятся неудовлетворительными уже на ранних стадиях увеличения числа ячеек, так как по мере увеличения числа ячеек форма суммарного выходного напряжения стремится в пределе к треугольным импульсам.

Второй вариант является продолжением первого, с той лишь разницей, что центральная часть импульса расширяется. Такой метод позволяет обеспечить форму выходного напряжения, в пределе стремящуюся к трапеции. Этот метод обеспечивает лучший спектр по сравнению с равномер-



Рис. 3. Алгоритм включения отдельных ячеек при равномерном сдвиге

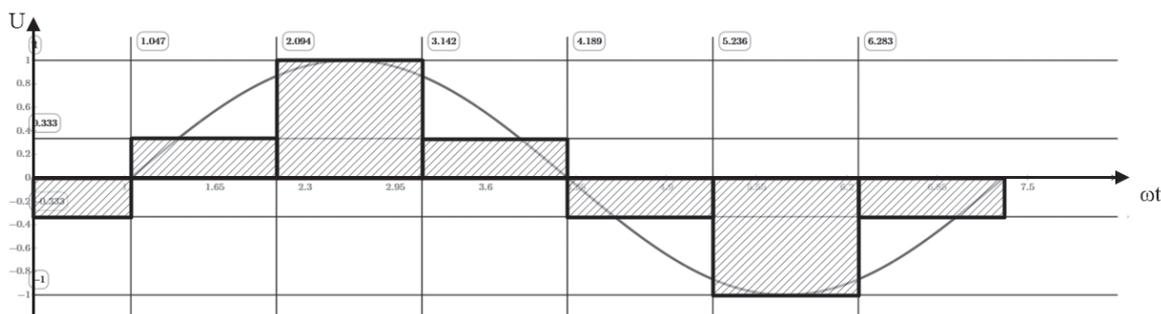


Рис. 4. Суммарный выходной сигнал инвертора с равномерным сдвигом ячеек

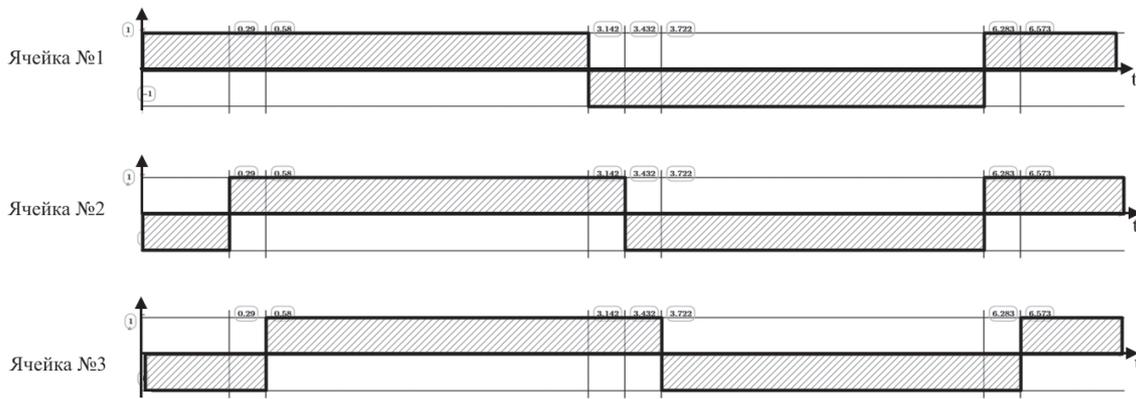


Рис. 5. Алгоритм включения отдельных ячеек при аппроксимации в трапецидальную форму выходного напряжения

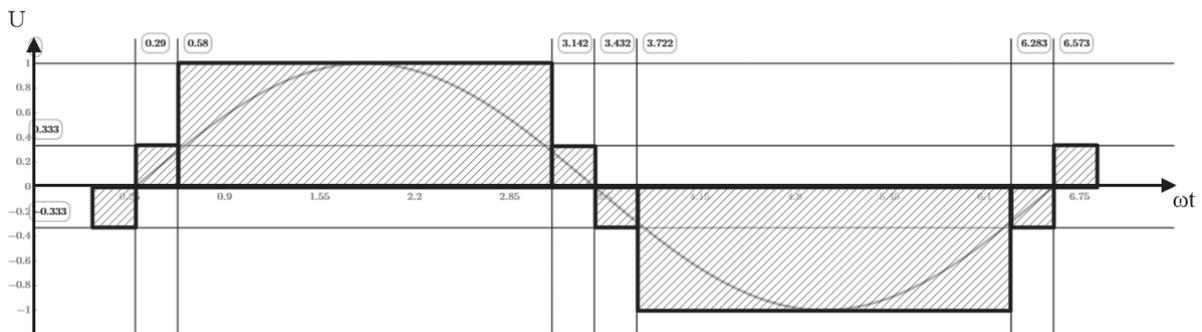


Рис. 6. Суммарное выходное напряжение инвертора при аппроксимации в трапецидальную форму

ным смещением включения. Известно, что оптимальным углом наклона боковой грани трапеции для обеспечения наилучшего спектра является угол в 60° [3].

Алгоритм работы традиционных схем для получения заданных уровней напряжения предполагает последовательное сложение напряжений отдельных ячеек на всем периоде основной гармоники. В предложенном алгоритме для приближения к синусоидальной форме сигнала эталонный синусоидальный сигнал делится на равные уровни, исходя из количества ячеек инвертора. Затем определяются точки пересечения уровней с синусоидальным сигналом, находятся длительности каждого уровня. Такой алгоритм позволяет равномерно распределить нагрузку на все ячейки. Другие известные схемы формирования приближенного к синусои-

дальной форме выходного сигнала равномерной нагрузки ячеек не обеспечивают.

Точки пересечения синусоидального сигнала и аппроксимирующего находятся по формуле

$$\alpha_i = a \sin \frac{(1-P)\left(\frac{\pi}{2} - i\right)}{\frac{N}{2}},$$

где P — верхний срез синусоидального опорного сигнала (рис. 7).

Необходимо отметить, что в приведенном примере моделируемый сигнал вписывается в синусоидальный. Для обеспечения возможности построения полноценного максимального уровня необходимо сделать срез от высшей точки синусоидального сигнала. Оптимальная величина среза в зави-

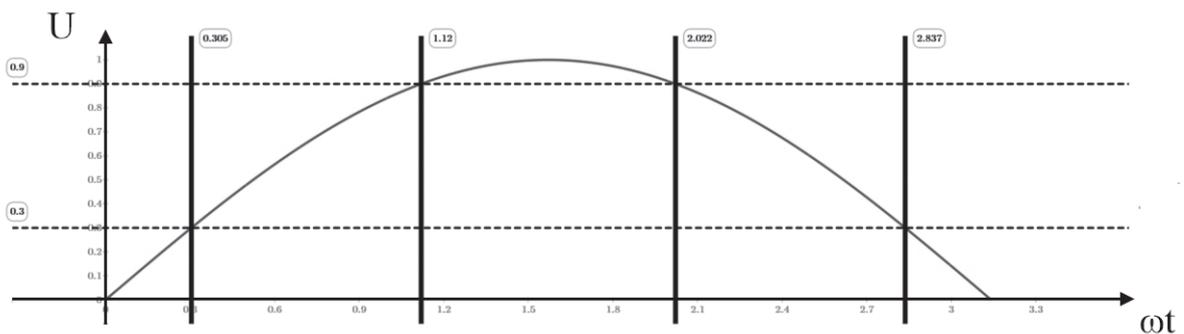


Рис. 7. Точки пересечения уровней напряжения с синусоидальным эталонным сигналом

симости от числа уровней напряжения на данный момент не рассчитана.

Каждый временной отрезок работы уровня напряжения разбивается на равные промежутки по количеству ячеек инвертора (рис. 8). Суммарное напряжение каждого уровня формируется путем сложения напряжений, как последовательного, так и параллельного, всех ячеек.

Моменты включения ячеек инвертора (рис. 9) определяются по следующей формуле:

$$\alpha_j^i = \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{N} \right) j + \alpha_i,$$

где j — порядковый номер ячейки, $j = 1, \dots, N$.

Суммарный выходной сигнал инвертора, работающего по предлагаемому алгоритму, изображен на рис. 10.

Отметим недостаток алгоритма. В случае нечетного количества ячеек нижний уровень напряжения необходимо продлить до половины периода функции, в противном случае нарушается равномерность в распределении нагрузки ячеек. В случае четного количества ячеек алгоритм реализуется без увеличения времени работы уровня напряжения.

Предложенный алгоритм работы инверторных ячеек позволяет создать масштабируемые схемы их включения. Теоретически максимальное число яче-

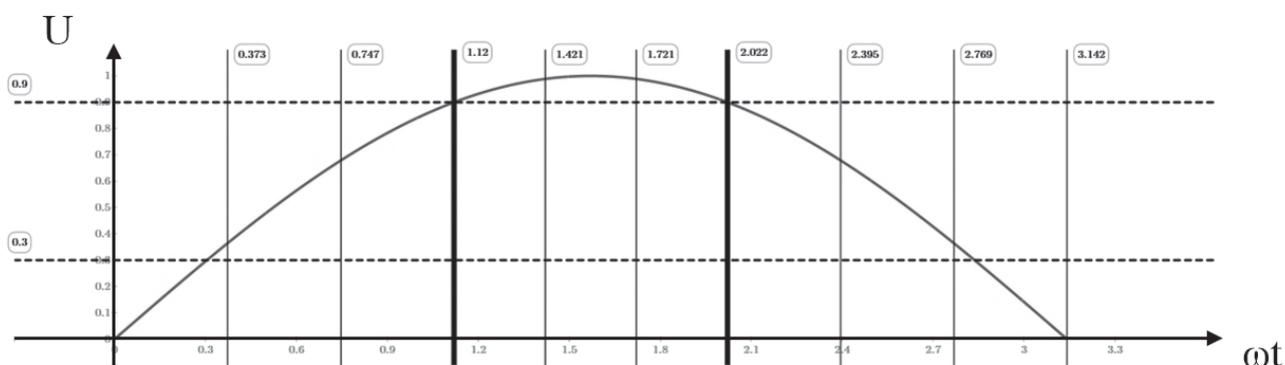


Рис. 8. Разбиение уровней напряжения по времени включения каждой ячейки, исходя из числа ячеек

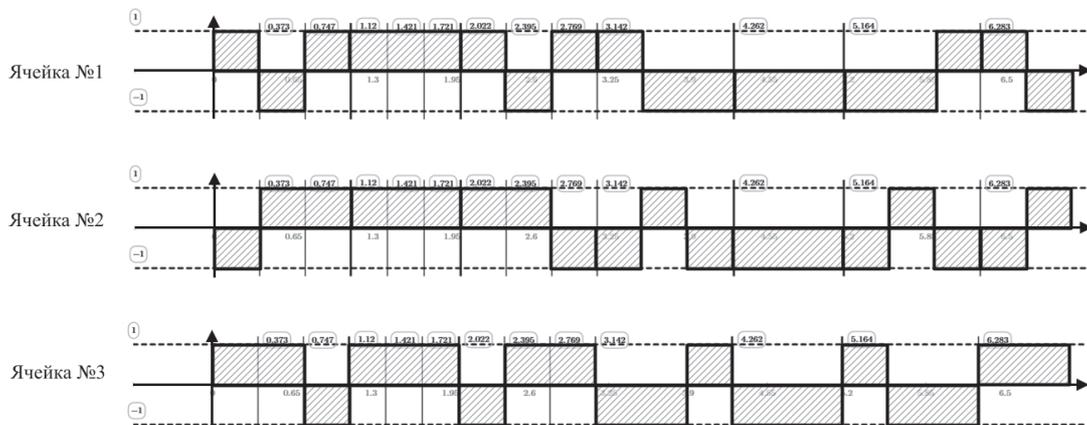


Рис. 9. Предлагаемый алгоритм включения отдельных ячеек

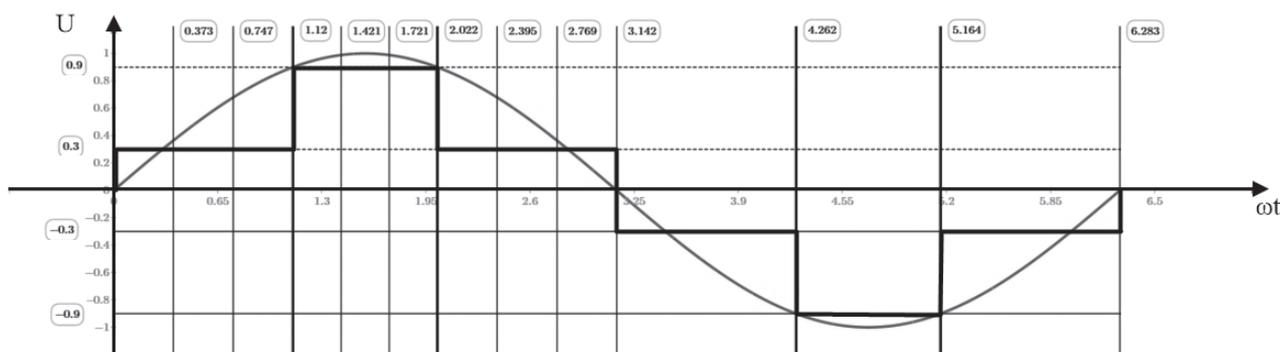


Рис. 10. Суммарный выходной сигнал предлагаемого алгоритма

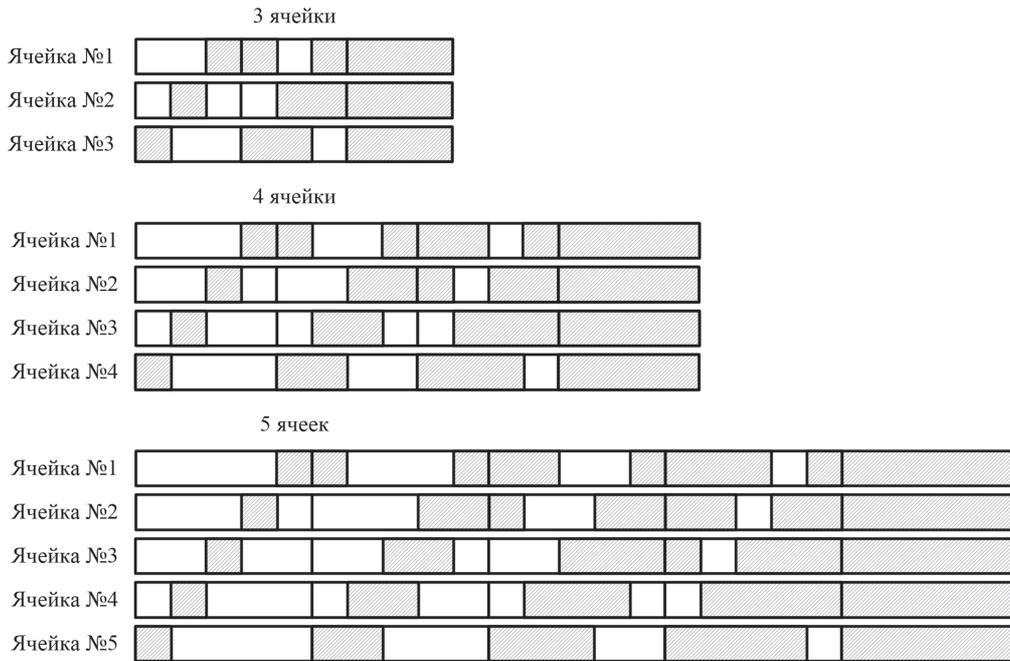


Рис. 11. Визуализация предлагаемого алгоритма включения ячеек инвертора

ек инвертора зависит от минимального времени коммутации силового ключа, входящего в состав одной ячейки инвертора.

На рис. 11 представлена диаграмма моментов включения ячеек для инверторов с различным числом ячеек за четверть периода аппроксимируемого синусоидального сигнала. В качестве примера выбраны верхние ключи инвертора. При любом числе ячеек инвертора сохраняется равная нагрузка на все ячейки. Данная схема четко структурирована, что позволяет масштабировать алгоритм коммутации для различного числа ячеек, а также существенно упрощает вычисление новых моментов включения в случае изменения схемы, например при выходе из строя какой-либо ячейки.

Результаты моделирования

Моделирование было проведено в пакете программ Pspice — общепринятом стандарте моделирования процессов в электрических цепях.

Проведено моделирование трех вариантов формирования многоуровневого напряжения, а также спектральный анализ. При этом менялся только алгоритм работы силовых ключей, а сама схема модели (рис. 12) оставалась неизменной.

Результаты моделирования выходного сигнала инвертора рассмотренных алгоритмов и его спектральный анализ представлены на рис. 13—18.

Спектральный анализ нового алгоритма показывает, что низшие из высших гармоник практически отсутствуют.

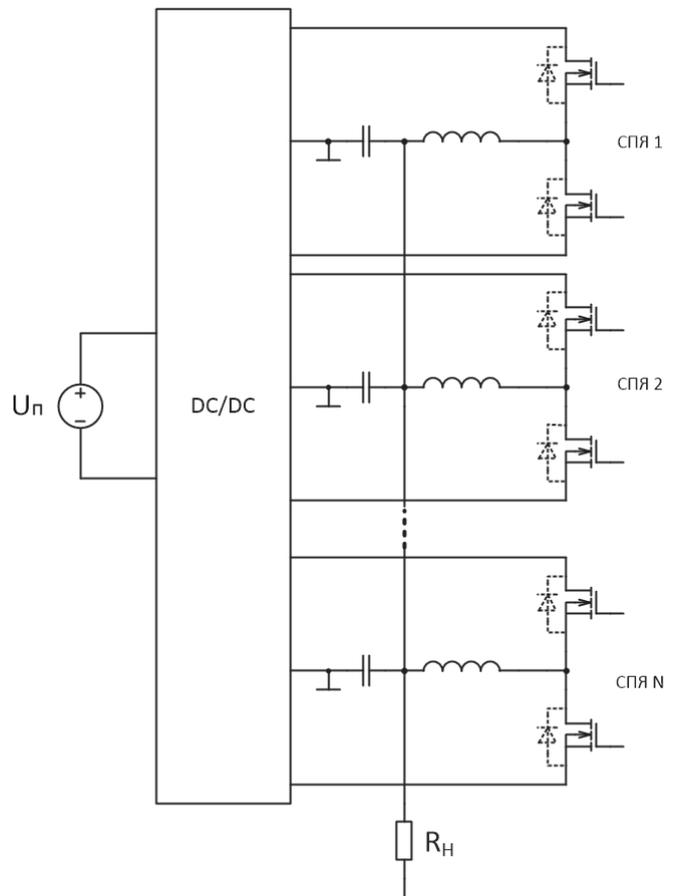


Рис. 12. Схема модели инвертора

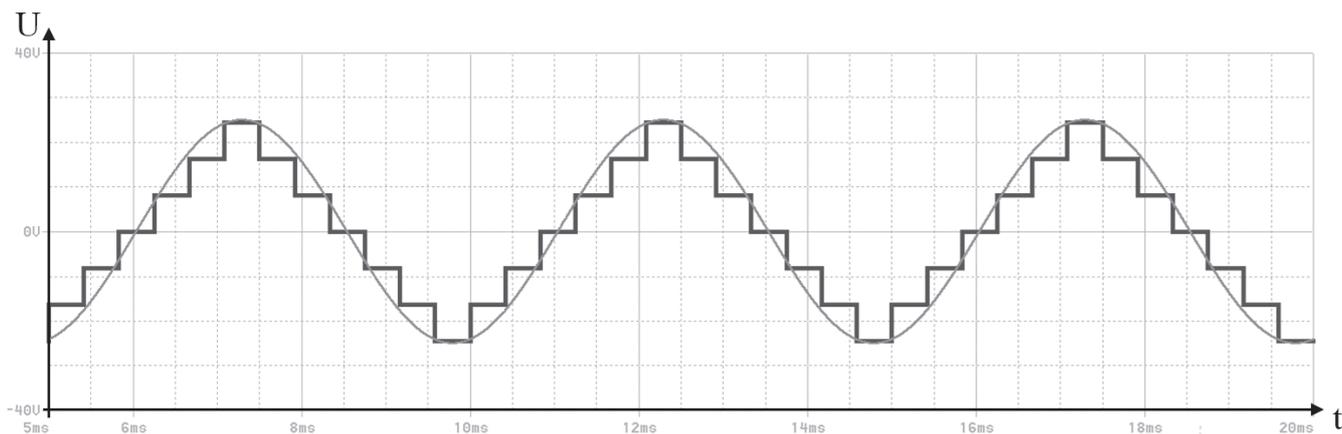


Рис. 13. Выходное напряжение модели при $N = 6$ инвертора с равномерным смещением ячеек в сравнении с синусоидальным сигналом

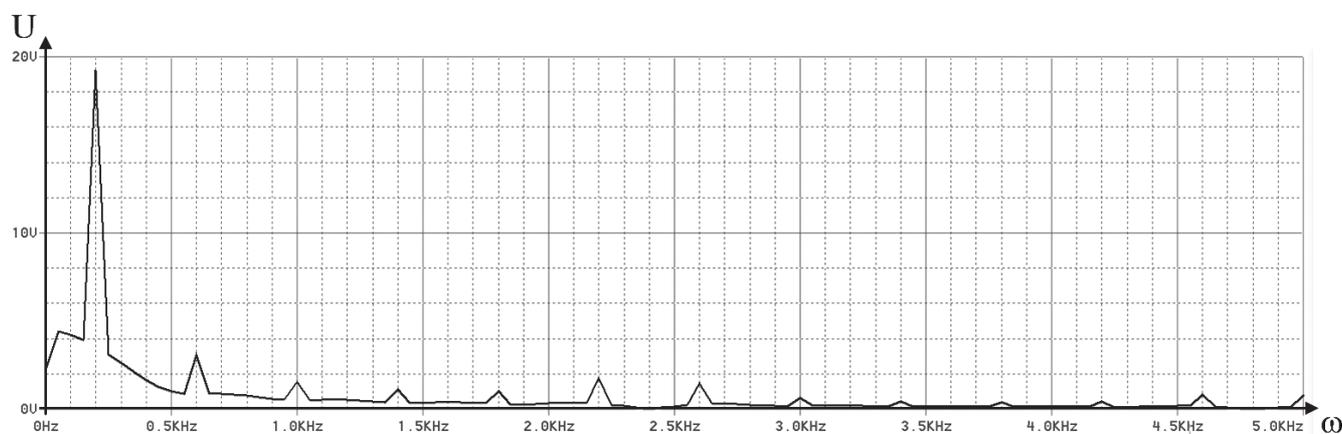


Рис. 14. Спектральный состав выходного сигнала при $N = 6$ инвертора с равномерным смещением ячеек

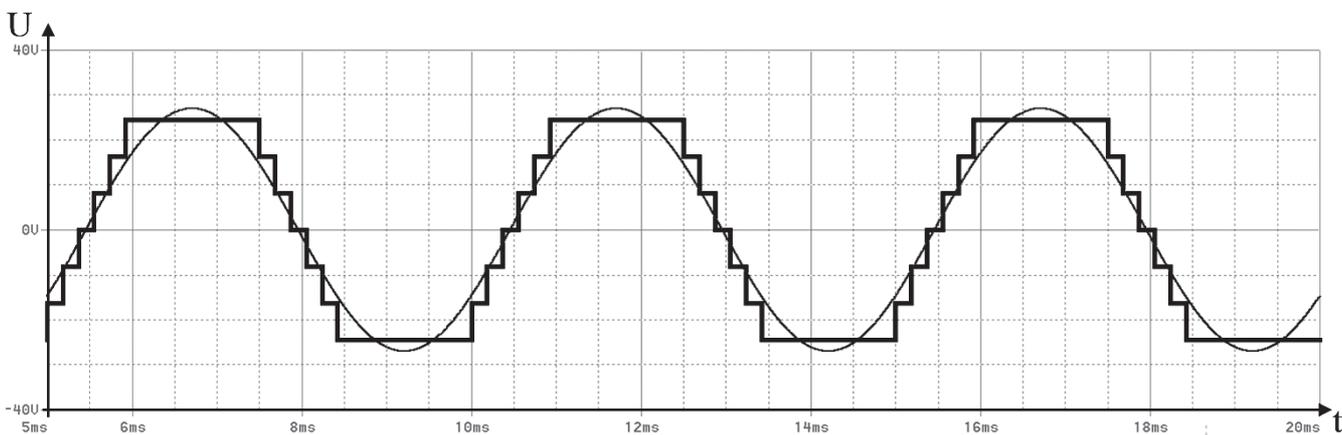


Рис. 15. Выходное напряжение модели при $N = 6$ инвертора при аппроксимации в трапецеидальную форму в сравнении с синусоидальным сигналом

Выводы

Анализ результатов моделирования предложенного алгоритма показал следующее:

- При увеличении количества ячеек напряжение, формируемое на входе фильтра инвертора, приближается к синусоидальной форме.

- Алгоритм работы позволяет легко масштабировать количество ячеек, сохраняя равномерное распределение нагрузки по силовым ячейкам.
- В спектре выходного напряжения практически отсутствуют низшие из высших гармоник уже при шести ячейках, что позволяет снизить массу выходного фильтра.

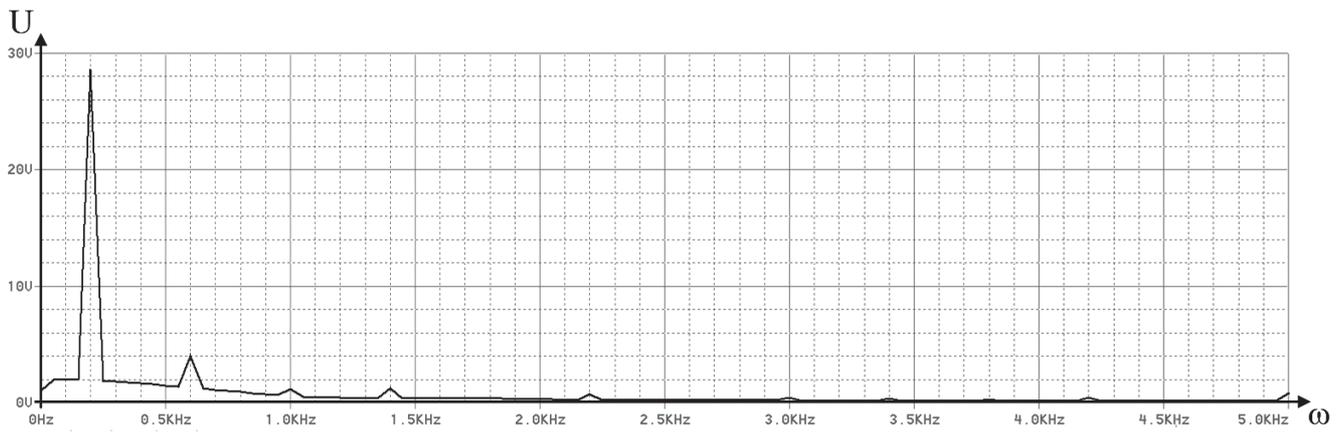


Рис. 16. Спектральный состав выходного напряжения при $N = 6$ инвертора при аппроксимации в трапецидальную форму

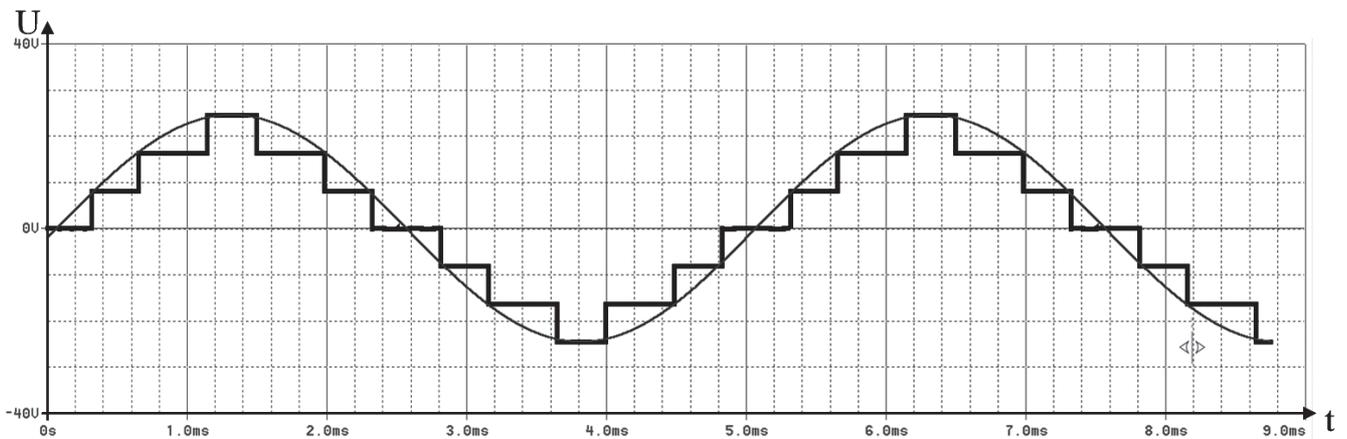


Рис. 17. Выходное напряжение модели при $N = 6$ инвертора с применением нового алгоритма переключения ячеек в сравнении с синусоидальным сигналом

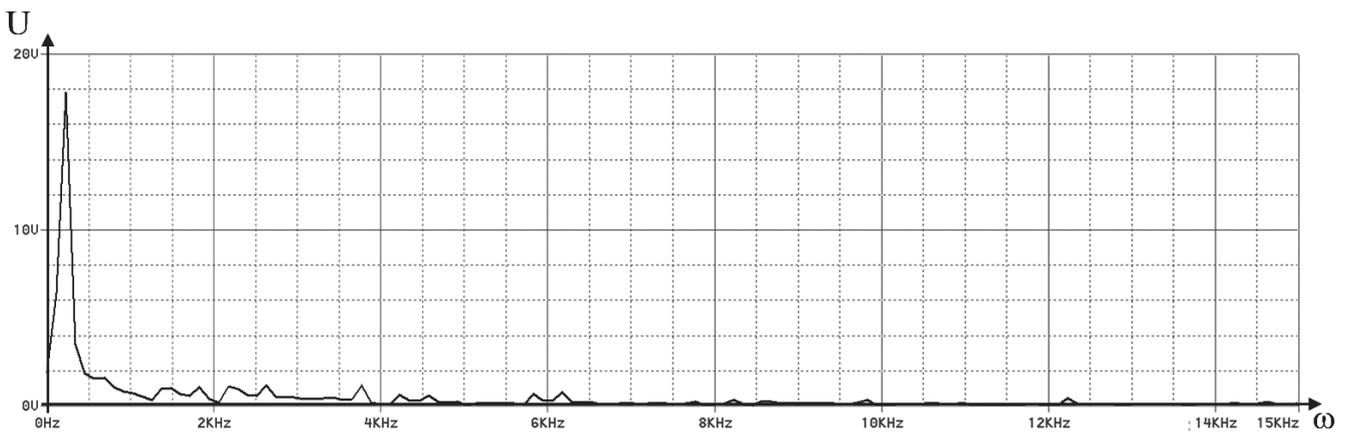


Рис. 18. Спектральный состав выходного напряжение при $N = 6$ инвертора с применением нового алгоритма переключения ячеек

Библиографический список

1. Каганов И.Л. Многофазный инвертор, авторское свидетельство № 64160, Бюл. № Л123569, опубликовано 31.01.1945.
2. Бражников А.В., Бабин В.А., Белозеров И.Р. Увеличение числа фаз как способ совершенствования
3. Мыцык Г.С. Методология структурно-алгоритмического синтеза и анализа малоискажающих устройств

техико-экономических показателей и расширения области применения автономных инверторов напряжения // Успехи современного естествознания. 2010. № 3. С. 110-111.

- силовой электроники для электротехнических комплексов автономных объектов: дисс. докт. техн. наук. — М.: МАИ, 2001. — 432 с.
4. Головацкий В.А., Гулякович Г.Н., Конев Ю.И. и др. Источники вторичного электропитания / Под ред. Ю.И. Конева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1990. — 280 с.
 5. Мыцык Г.С. Преобразование параметров многофазных сигналов на основе принципа квазиполосной модуляции // Электричество. 1986. №11. С. 45-55.
 6. Конев Ю.И. Некоторые проблемы развития источников вторичного электропитания // Научно-технический сборник «Электропитание». 1993. №1. С. 5-15.
 7. Цырук С.А., Янченко С.А. Гармонический анализ нелинейных электроприемников офисных центров // Промышленная энергетика. 2012. №3. С. 54-62.

OUTPUT VOLTAGE OF MULTI-PHASE INVERTER WITH SINE-WAVE APPROXIMATION OF SWITCHING CELLS GENERATION ALGORITHM

Schetinin V.E.* , Averin S.V.**

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

* e-mail: shetininve@gmail.com

** e-mail: a_cb@mail.ru

Abstract

Operation algorithm of traditional multi-phase inverter structures for multi-level output voltage formation assumes consecutive summing of voltages from individual cells along the period of the function. According to the proposed algorithm, sinusoidal reference signal is divided into equal voltage levels in accordance with the number of inverter cells so that the output voltage approaches sinusoidal waveform. Then we determine the intersection points of voltage levels with the sinusoidal signal and time intervals for each level. The increment value of voltage levels is the same. It depends upon the number of cells, and only the durations of each level vary. As a result we obtain approximated sinusoidal signal. By increasing the number of cells, the output voltage approaches the form of the reference sinusoidal signal.

Each time interval of a voltage level operation is divided into equal intervals, according to the number of inverter cells. Then, using the proposed algorithm of power switches commutation, we obtain the total voltage of each level by summing voltages of all cells both in serial and in parallel.

This algorithm allows uniform distribution of the loads of all cells, which, in its turn, allows using similar cells for multilevel inverter. Other well-known schemes for formation of an approximate sinusoidal output signal does not provide an equal cells load.

The proposed algorithm of operation of power switches of cells is clearly structured, and allows commutation scheme scaling for any number of cells. Theoretically, the maximum number of cells of a

multi-phase inverter depends on the minimum switching time of a single power switch, comprising a cell of an inverter.

The study of simulation results show that there are practically no low-order harmonics when the number of cells equals to six.

Keywords: secondary power supply, inverter, switching algorithm, multi-channel conversion, voltage spectral analysis.

References

1. Kaganov I.L. *Avtorskoe svidetel'stvo №64160*, 31.01.1945.
2. Brazhnikov A.V., Babin V.A., Belozerov I.R. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2010, no. 3, pp. 110-111.
3. Mytsyk G.S. *Metodologiya strukturno-algoritmicheskogo sinteza i analiza maloiskazhayushchikh ustroystv silovoi elektroniki dlya elektrotekhnicheskikh kompleksov avtonomnykh ob'ektov* (The methodology of structural and algorithmic synthesis and analysis of low-distorted power electronics devices for electrical systems of autonomous objects), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2001, 432 p.
4. Golovatskii V. A., Gulyakovich G. N., Konev Yu.I. *Istochniki vtorichnogo elektropitaniya* (Secondary electric power supplies), Moscow, Radio i svyaz', 1990, 280 p.
5. Mytsyk G.S. *Elektrichestvo*, 1986, no. 11, pp. 45-55.
6. Konev Yu.I. *Nauchno-tehnicheskii sbornik "Elektropitanie"*, 1993, no. 1, pp. 5-15.
7. Tsyruk S.A., Yanchenko S.A. *Promyshlennaya energetika*, 2012, no. 3, pp. 54-62.