

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЯЧЕЙКОВЫХ ИНВЕРТОРОВ ПРИ ЧЕТНОМ И НЕЧЕТНОМ ЧИСЛЕ СИЛОВЫХ ЯЧЕЕК

Щетинин В.Е.

*МобТехОнлайн,
проезд 4806, д. 4, стр. 1, оф. 66М, Москва, 124498, Россия
e-mail: shetininve@gmail.com*

Представлены результаты моделирования многоячеечного инвертора с четным и нечетным числом силовых ячеек с регулированием посредством широтно-импульсного модулирования (ШИМ) выходного напряжения. Проведен сравнительный анализ результатов. Для формирования выходного напряжения многоячейкового инвертора предложен алгоритм переключения силовых транзисторов ячеек. Такой алгоритм позволяет сформировать на выходе силовой ячейки напряжение, аппроксимирующее синусоидальное, и обеспечить при этом равномерную загрузку всех ячеек инвертора. Показана работоспособность предлагаемого алгоритма для различного числа ячеек. Приведено имитационное компьютерное моделирование инвертора при различных параметрах регулирования напряжения и результаты спектрального анализа выходного напряжения инвертора для четного и нечетного числа ячеек.

Ключевые слова: источник вторичного электропитания, инвертор, ШИМ, спектральный анализ напряжения.

Введение

Развитие авиационной техники постепенно приводит к увеличению количества бортовой электроники и электроники, в том числе во многом потребителей первой категории, таких, как оборудование навигации, связи, бортовые самописцы, системы пожаротушения и пр., без которых невозможно безопасное завершение полета. В случае необходимости обеспечения питания от аккумуляторных батарей встает вопрос предоставления качественного электропитания для жизненно важных потребителей. Существующие инверторы имеют ограничения выходной мощности, а учитывая существующую отечественную элементную базу, трудно разработать инвертор требуемой мощности на базе единичного силового каскада.

В качестве варианта решения задачи увеличения выходной мощности инвертора предлагается применение многоячейкового инвертора, состоящего из нескольких единичных инверторов, позволяющих распределить общую нагрузку. В то же время применением микроконтроллеров можно добиться лучшей формы выходного напряжения, повышения коэффициента полезного действия (КПД) и уменьшения массогабаритных показателей инвертора.

Многоячейковая структура инвертора ранее рассматривалась в литературе [1, 2]. В основе при-

меняемых ранее методов лежал равномерный сдвиг фаз работы ячеек инвертора либо неравномерная работа отдельных ячеек.

Рассматривается метод формирования выходного напряжения по алгоритму, аппроксимирующему синусоидальный сигнал и обеспечивающему равномерную нагрузку единичных ячеек инвертора. Аппроксимация позволит улучшить выходное напряжение инвертора, уменьшить массогабаритные показатели фильтров, в то время как равномерная нагрузка ячеек позволит унифицировать единичный инвертор и повысить гибкость системы в случае выхода из строя какого-либо компонента. Общий принцип работы алгоритма рассматривался в статье [5].

В исследуемой схеме инвертора, структура которого приведена на рис. 1, использован алгоритм приближения выходного напряжения к синусоидальной форме. Его особенность заключается в использовании синусоидального напряжения в качестве опорного для вычисления моментов коммутации силовых ключей ячеек инвертора и равномерного распределения времени работы ячеек независимо от их числа. Расчеты проводились исходя из требований современного стандарта трехфазной бортовой сети переменного тока с фазным напряжением 115 В с частотой 400 Гц.

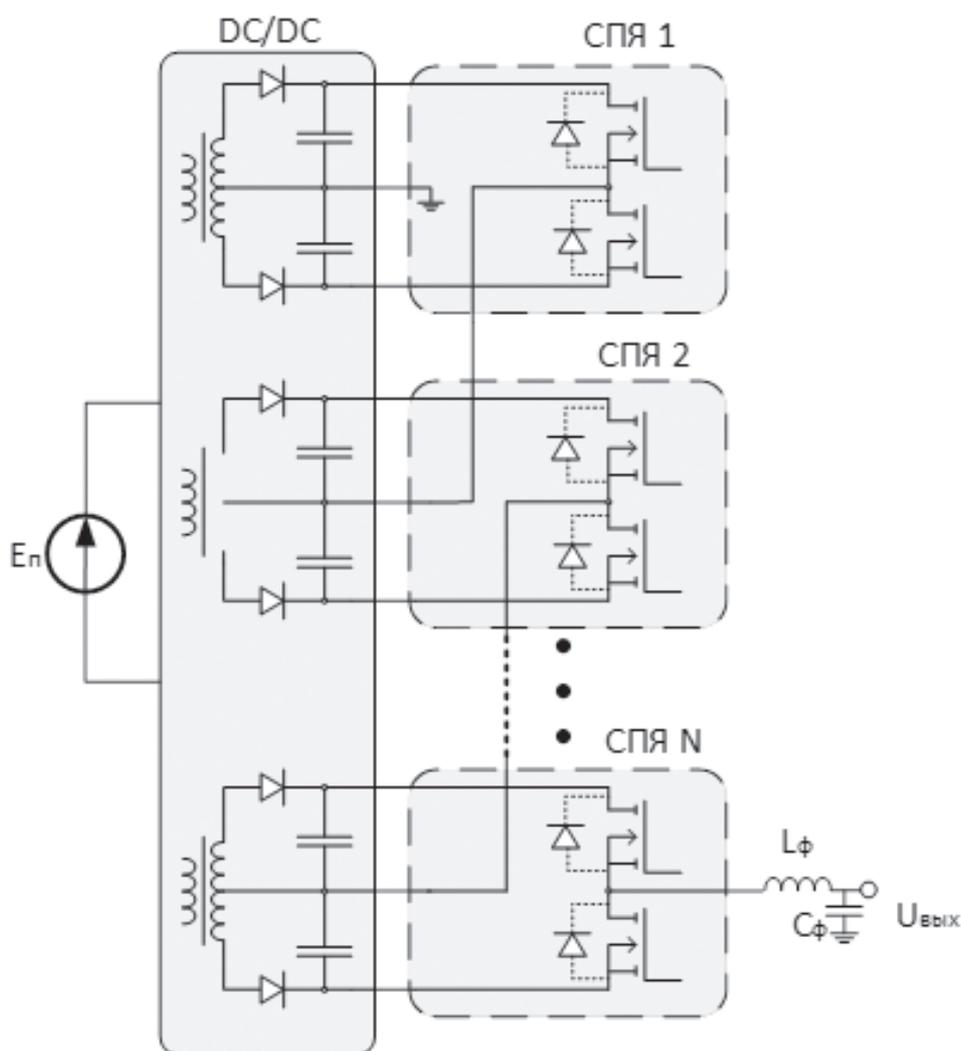


Рис. 1. Структура моделируемого инвертора

Описание работы алгоритма

В разработанном алгоритме моделируемый сигнал представляет собой многоуровневую аппроксимацию синусоидального сигнала. Аппроксимированный сигнал имеет амплитуду, идентичную опорной синусоиде, и описывает синусоиду по высшей ее точке.

Исходя из числа силовых ячеек инвертора, необходимо получить моменты переключения уровней напряжения как $Y_{1A} = \sin \alpha_1$. Из условия равенства уровней напряжения $Y_{A1} = Y_{A2}, \dots, Y_{AN}$ определяем моменты переключения как точки пересечения последующих заданных уровней аппроксимирующего напряжения с опорной синусоидой на первой четверти периода.

В случае нечетного числа ячеек значения уровней напряжения определяются по следующей формуле:

$$Y_{Ai} = \frac{N-i}{2}, \tag{1}$$

где N — число ячеек инвертора;
 i — порядковый номер уровня напряжения, $i = 0 \dots N$.

Точки пересечения синусоидального сигнала и аппроксимирующего определяются по формуле

$$a_i = \arcsin \frac{N-i}{2}. \tag{2}$$

Необходимо отметить, что, в отличие от четного числа ячеек [6], для нечетного числа ячеек добавляются дополнительные моменты переключения в точках пересечения синусоидой оси ординат. Ввиду специфики расчета эти точки не описываются указанными выше формулами, но являются очевидными при построении аппроксимированного напряжения.

На рис. 2 изображены линии пересечения уровней напряжения и опорного синусоидального напряжения. В качестве примера рассмотрим инвертор, состоящий из трех ячеек. В этом случае возможны следующие уровни напряжения: $1, -\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 1$.

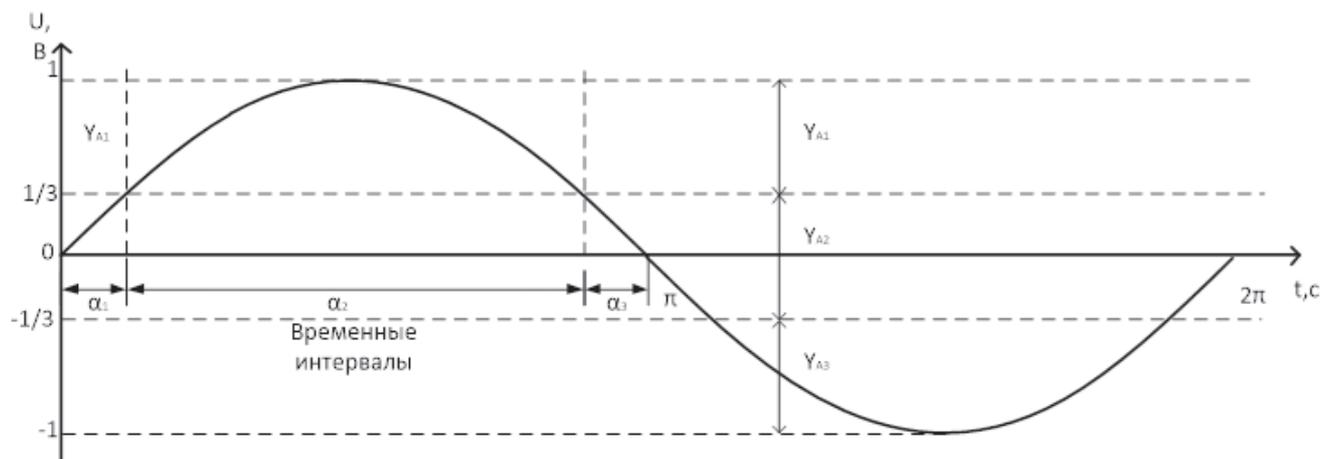


Рис. 2. Формирование аппроксимирующего напряжения

Для обеспечения равномерной нагрузки всех ячеек инвертора предложено каждый временной интервал формирования уровня аппроксимирующего напряжения разбить на равные субинтервалы по количеству ячеек инвертора.

Моменты переключения силовых ключей ячеек инвертора определяются по следующей формуле [5]:

$$\alpha_j^i = \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{N} \right) + \alpha_{j-1}^i, \quad (3)$$

где j — порядковый номер субинтервала уровня напряжения, $j = 1 \dots N$.

На рис. 3 показано разбиение интервалов на субинтервалы для определения моментов переключения силовых ключей ячеек инвертора.

Алгоритм переключения подразумевает как последовательное включение ячеек, так и их параллель-

ную работу. На рис. 4 приведена диаграмма переключения силовых ключей инвертора и получаемый суммарный аппроксимирующий сигнал. На первом интервале сумма напряжений всех ячеек равна одной трети входного напряжения, на втором интервале — входному напряжению, на третьем — опять одной трети входного напряжения и т.д.

Предложенный алгоритм переключения силовых ключей ячеек инвертора позволяет создать масштабируемые схемы их переключения. Теоретически, максимальное число ячеек инвертора зависит от минимального времени коммутации силового ключа, входящего в состав одной ячейки инвертора.

Моделирование

В качестве исследуемой модели выбран инвертор с числом ячеек, равным семи. Моменты переключения ключей ячеек получены согласно описанному выше алгоритму.

Согласно формуле (1) определяются значения уровней напряжения. Для семиячейкового инвертора значения получаются следующие: $1, 0.714, 0.429, 0.143, -0.143, -0.429, -0.714, -1$.



Рис. 3. Разбиение уровней напряжения по времени включения каждой ячейки исходя из числа ячеек

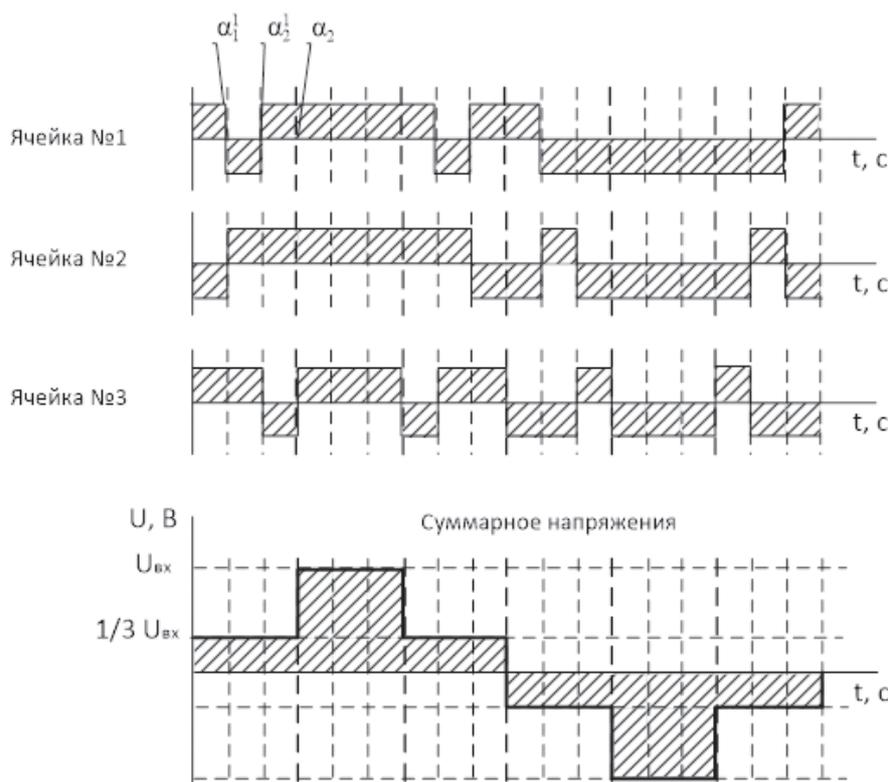


Рис. 4. Алгоритм переключения ключей ячеек для каждого уровня напряжения

Вычисляем моменты переключения силовых ключей ячеек инвертора по формуле (2). В табл. 1 приведены результаты вычислений моментов пере-

Компьютерная модель семиячейкового инвертора с ШИМ-регулированием представлена на рис. 5.

Таблица 1

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
0,0570	0,1762	0,3165	0,9334	1,0737	1,1929	1,25

ключения силовых ключей для выходного напряжения частотой 400 Гц.

Субинтервалы переключения определяются согласно формуле (3). Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Работа алгоритма проверена в программном пакете OrCAD Pspice.

Модель восьмичейкового инвертора была предложена и рассмотрена в [6], результаты вычислений использовались для получения сравнительных графиков выходных напряжений.

На рис. 6—15 показаны результаты моделирования для инвертора с числом силовых ячеек, равным 7 и 8.

Таблица 2

Номер ячейки	Номер субинтервала						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,00815	0,01630	0,02444	0,03259	0,04074	0,04889	0,05704
2	0,07406	0,09109	0,10812	0,12515	0,14217	0,15920	0,17623
3	0,19628	0,21632	0,23637	0,25642	0,27647	0,29651	0,31656
4	0,40469	0,49281	0,58094	0,66906	0,75719	0,84531	0,93344
5	0,95349	0,97353	0,99358	1,01363	1,03368	1,05372	1,07377
6	1,09080	1,10783	1,12485	1,14188	1,15891	1,17594	1,19296
7	1,20111	1,20926	1,21741	1,22556	1,23370	1,24185	1,25000

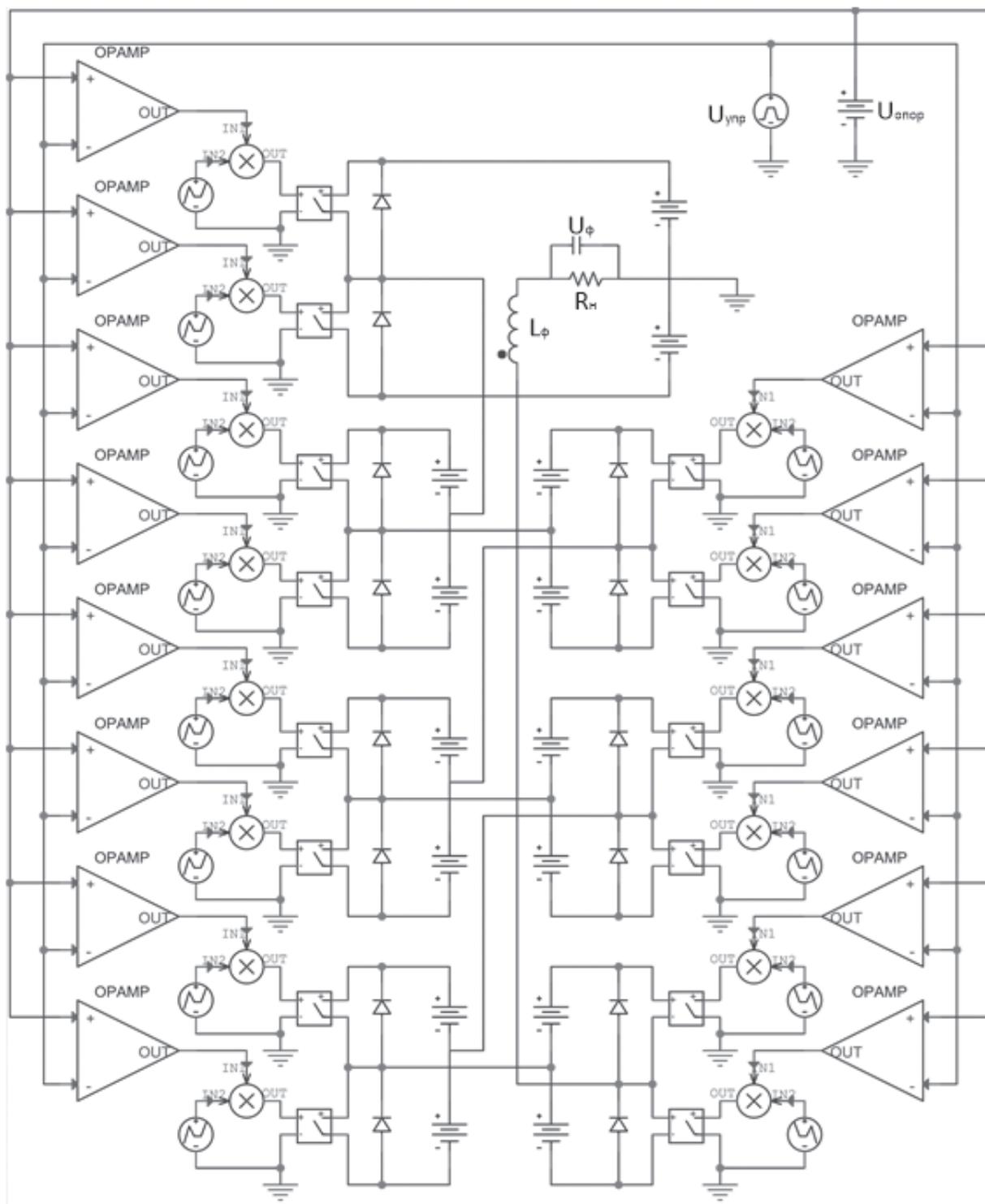


Рис. 5. Компьютерная модель семичейкового инвертора с ШИМ-регулированием

Выходное напряжения инвертора с нечетным числом силовых ячеек характеризуется более широкой формой сигнала, обусловленной тем, что при расчетах моментов переключения аппроксимируемый сигнал описывает опорную синусоиду, а не вписывается внутрь ее, как в случае с четным числом ячеек.

При моделировании напряжений, представленных на рис. 8 и 10, применялся фильтр с одинако-

выми параметрами. Спектральный анализ полученных напряжений показывает меньшее значение третьей и пятой гармоник в случае моделирования инвертора с семью ячейками.

При ШИМ-регулировании необходимо отметить уменьшение третьей гармоники в случае как восьми, так и семи ячеек инвертора.

Предложенный алгоритм работоспособен и при четном, и при нечетном числе силовых ячеек ин-

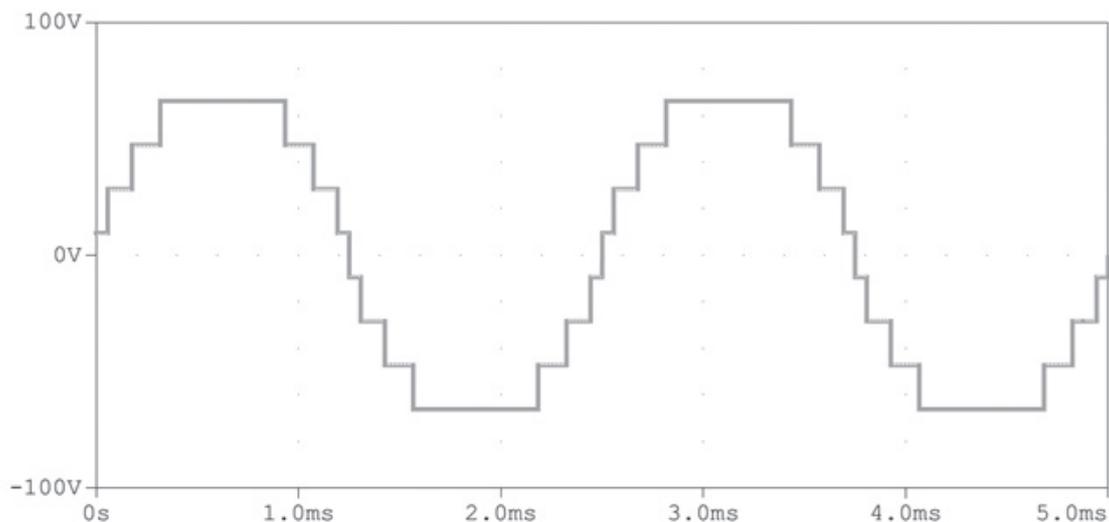


Рис. 6. Выходное напряжение семичейкового инвертора без использования выходного фильтра и ШИМ

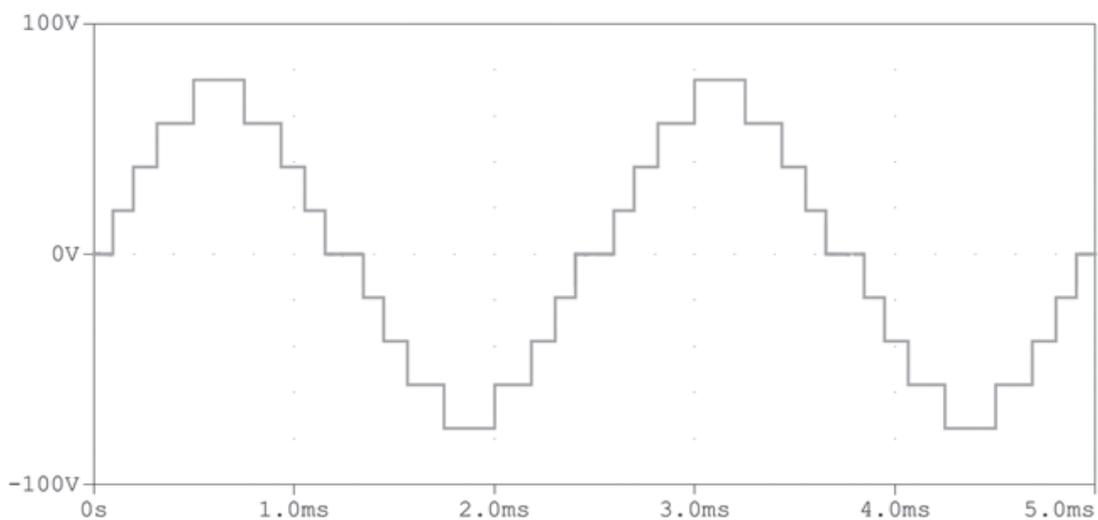


Рис. 7. Выходное напряжение восьмичейкового инвертора без использования выходного фильтра и ШИМ

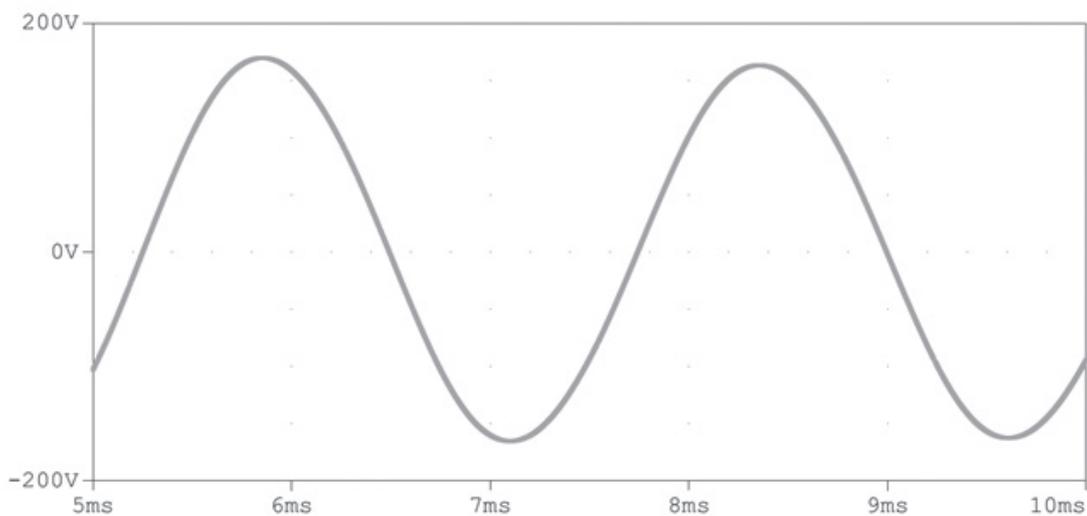


Рис. 8. Напряжение на выходе фильтра семичейкового инвертора с применением фильтра

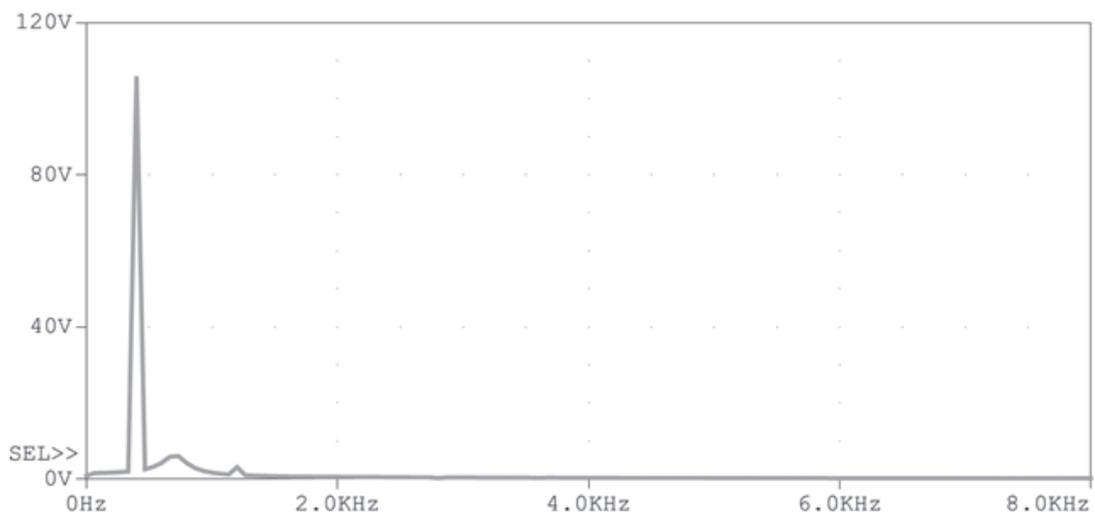


Рис. 9. Спектральный состав напряжения на выходе фильтра семиячейкового инвертора с применением фильтра

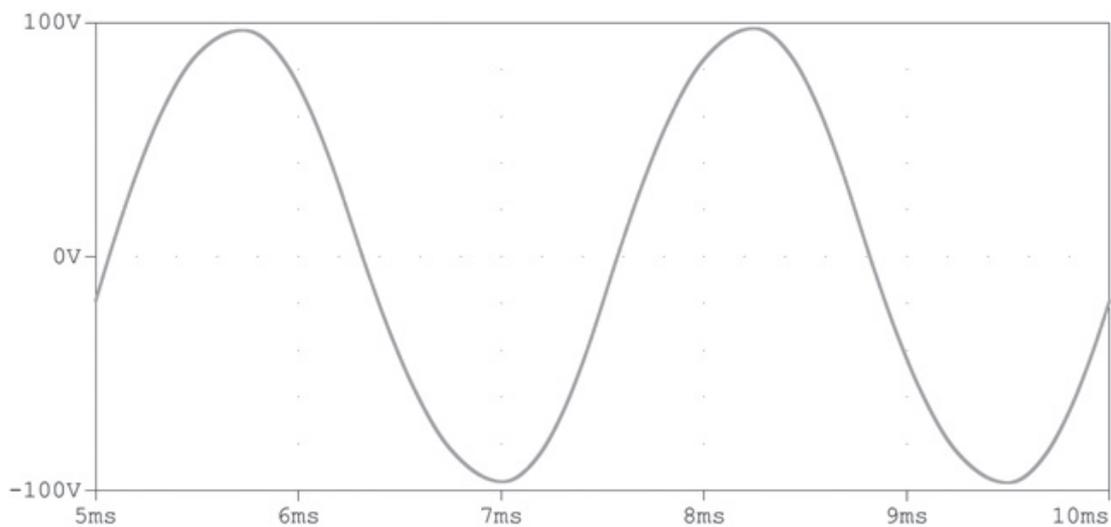


Рис. 10. Напряжение на выходе фильтра восьмичейкового инвертора с применением фильтра

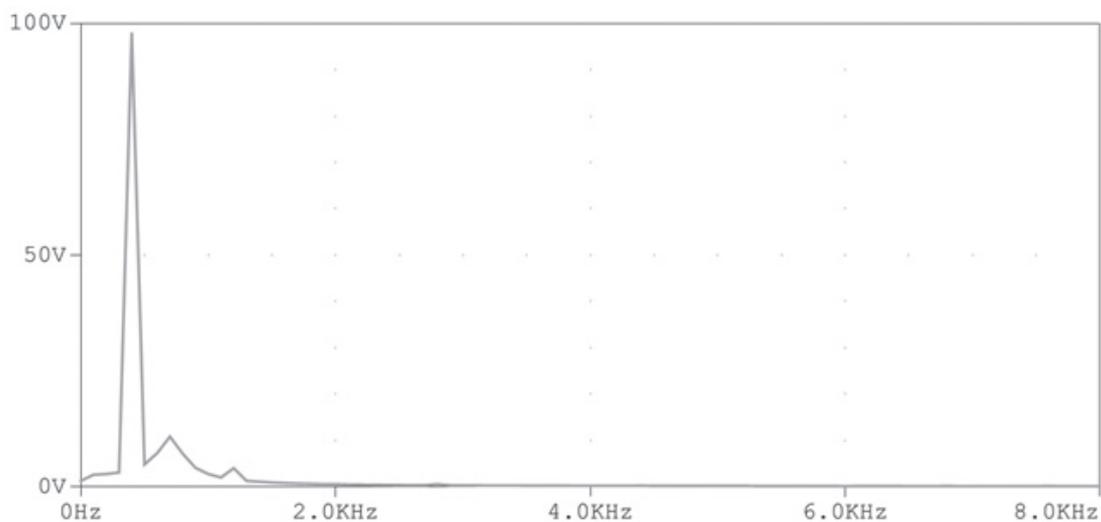


Рис. 11. Спектральный состав напряжения на выходе фильтра восьмичейкового инвертора с применением фильтра

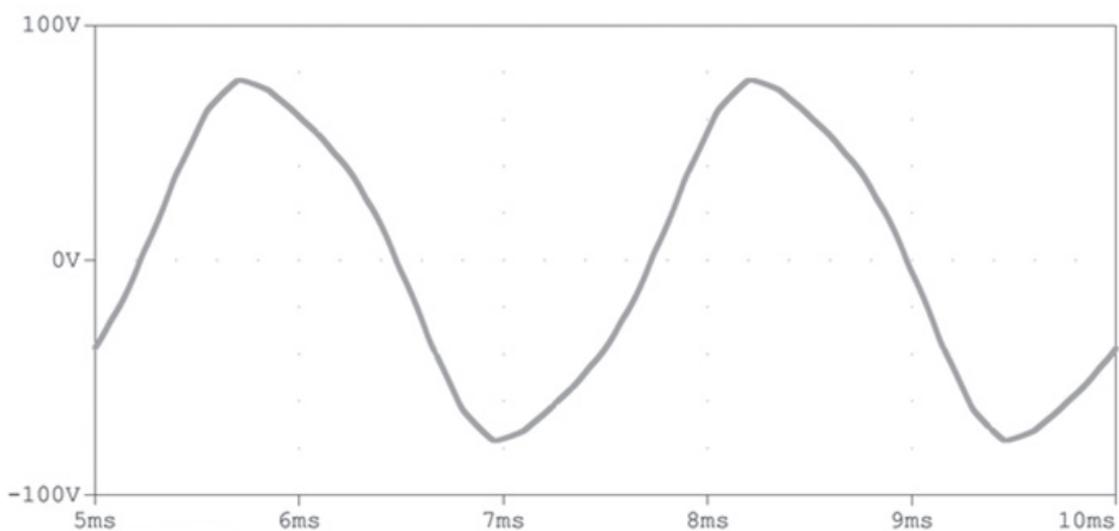


Рис. 12. Напряжение на выходе фильтра семиячейкового инвертора с применением фильтра и ШИМ с коэффициентом заполнения, равным 0.8

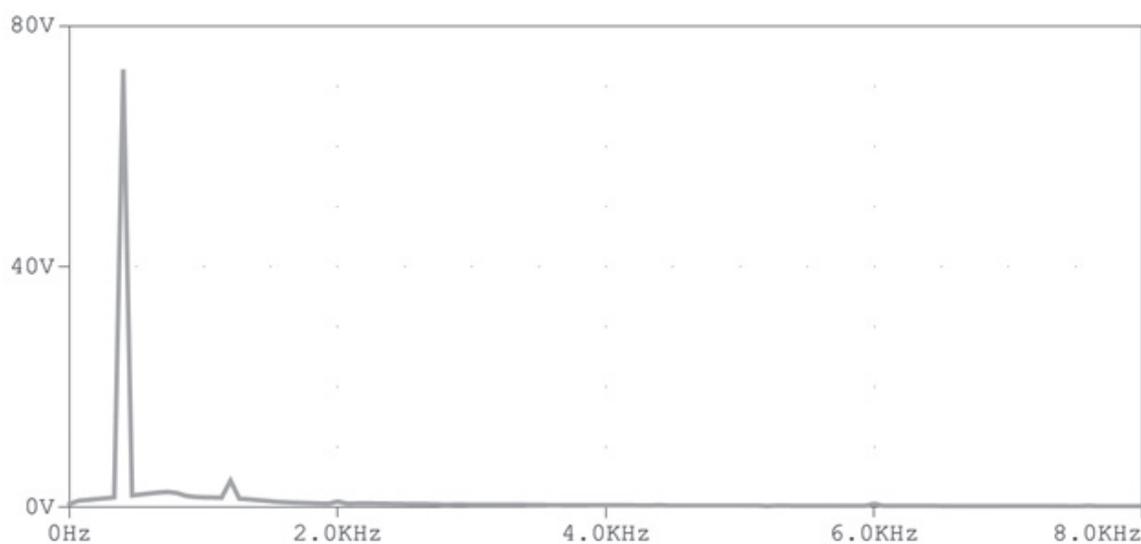


Рис. 13. Спектральный состав напряжения на выходе фильтра семиячейкового инвертора с применением фильтра и ШИМ с коэффициентом заполнения, равным 0.8

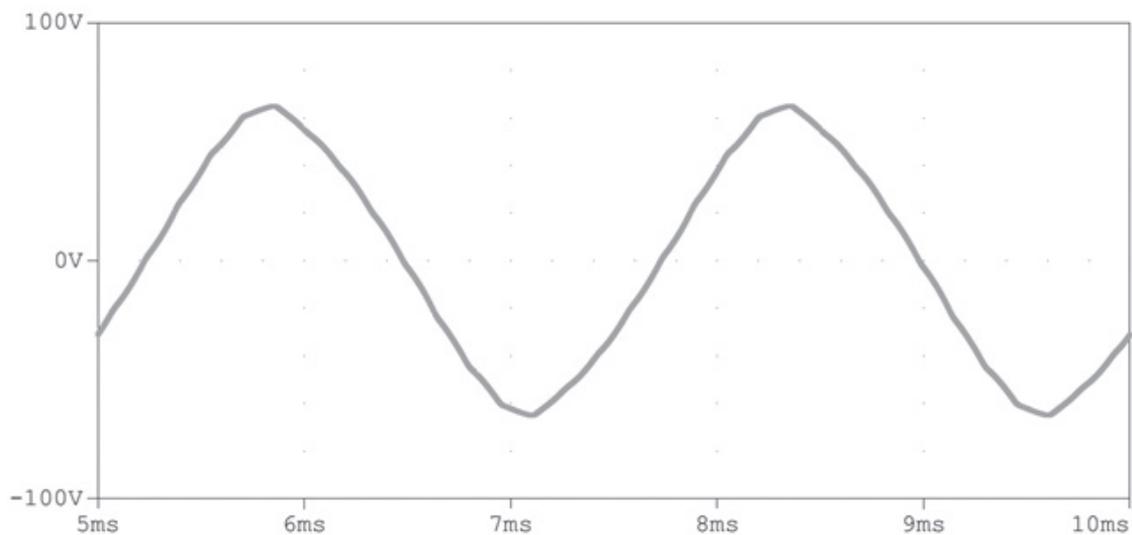


Рис. 14. Напряжение на выходе фильтра восьмичейкового инвертора с применением фильтра и ШИМ с коэффициентом заполнения, равным 0.8

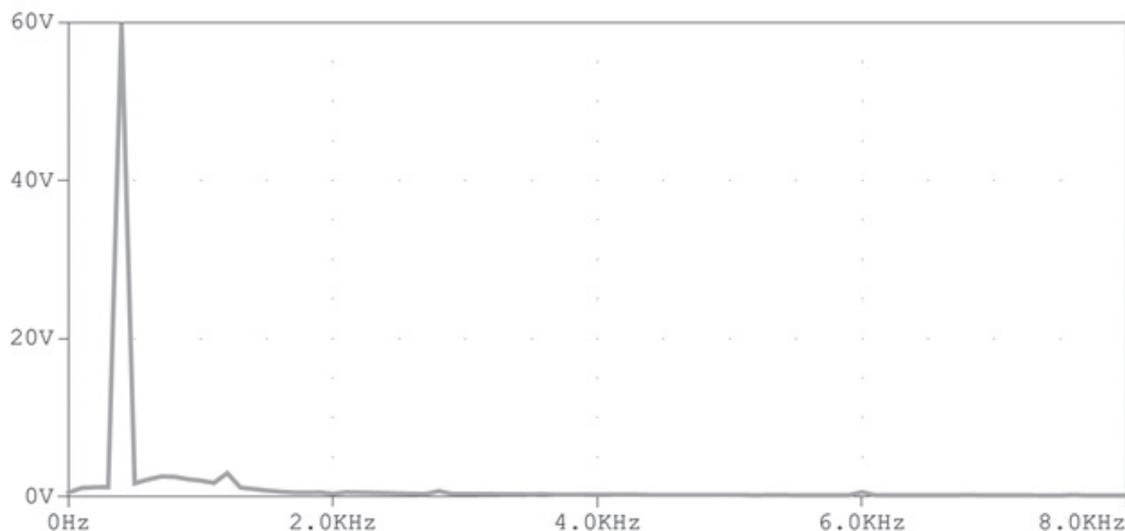


Рис. 15. Спектральный состав напряжения на выходе фильтра восьмичейкового инвертора с применением фильтра и ШИМ с коэффициентом заполнения, равным 0.8

вертора. При сравнении лучшие результаты показывает вариант с нечетным числом ячеек, несмотря на меньшее число единичных ячеек.

Выводы

1. Предложен алгоритм формирования выходного напряжения инвертора с многоячейковой структурой, позволяющий получить синусоидально аппроксимированное напряжение на выходе инвертора при равной нагрузке на единичную ячейку.

2. Продемонстрирована работоспособность алгоритма при различном числе ячеек инвертора.

3. Получены выражения для определения интервалов уровней напряжения, субинтервалов для определения моментов переключения силовых ключей ячеек инвертора.

4. Представлены сравнительные результаты вычислений выходных напряжений инвертора при четном и нечетном числе ячеек.

Библиографический список

1. Бражников А.В., Бабин В.А., Белозеров И.Р. Увеличение числа фаз как способ совершенствования технико-экономических показателей и расширения области применения автономных инверторов напряжения // *Успехи современного естествознания*. 2010. № 3. С. 110–111.
2. Мыцк Г.С. Методология структурно-алгоритмического синтеза и анализа малоискажающих устройств силовой электроники для электротехнических комплексов автономных объектов: дис. ... докт. техн. наук. — М., 2001. — 432 с.
3. 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.
4. Конев Ю.И. Некоторые проблемы развития источников вторичного электропитания // *Научно-технический сборник «Электропитание»*. 1993. №1. С. 5–15.
5. Щетинин В.Е., Аверин С.В. Алгоритм формирования выходного напряжения многофазного инвертора с синусоидальной аппроксимацией включения ячеек // *Вестник Московского авиационного института*. 2015. Т.22. №4. С. 159–167.
6. Щетинин В.Е., Аверин С.В. Алгоритм управления силовыми ключами многоячейкового инвертора в режиме ШИМ // *Практическая силовая электроника*. 2016. №62. С. 35–43.

MULTI-CELL INVERTERS WITH EVEN AND ODD POWER CELLS COMPARATIVE ANALYSIS

Schetinin V.E.

*MobTechOnline,
4, str. 1, office 66M, proyezd 4806, Moscow, 124498, Russia
e-mail: shetininve@gmail.com*

Abstract

The development of aviation technology gradually leads to increase of the on-board electrics and electronics number, including consumers of the first category, which are indispensable for the safe completion of the flight. In case of providing power from batteries, the issue of high-grade power delivery for vital consumers arises.

As a candidate solution to the problem of inverter output power increasing we suggest to use multi-cell inverter comprising of several unit inverters, allowing distribute the total load. Besides, microcontroller implementation can result in better shape of the output voltage, increase of efficiency and weight and size characteristics reduction.

The paper considers the technique of inverter output voltage generating according to an algorithm allowing approximate sinewave signal and provide equal loading of each unit inverter. Such an approximation allows increase the output voltage quality, reduce the size of each output filter, while the uniform load will allow unify the unit inverter and enhance the system flexibility in case of one of the components failure.

For an odd number of inverter cells the amplitude of the approximated signal is identical to the reference sinewave and circumscribes the sinewave over its highest point.

To provide a uniform load of all inverter cells, the author suggests divide each time interval of approximating voltage level into equal subintervals according to the number of inverter cells. With this, each voltage level is formed as a serial and parallel addition of the inverter cells voltages.

This method of the inverter cells power switches commutation allows create scalable switched mode structures of multi cell inverters. Theoretically, the maximum number of inverter cells depends on the inverter cell power switch minimum switching time.

The paper compares the simulation results obtained for inverters with even and odd number of power cells. The variant with odd number of cells dempstrated the best characteristics despite the lower number of unit cells.

Keywords: secondary power supply, inverter, PWM, voltage harmonic analysis.

References

1. Brazhnikov A.V., Babin V.A., Belozеров I.R. *Uspеkhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2010, no. 3, pp. 110-111.
2. Mytsyk G.S. *Metodologiya strukturno-algoritmicheskogo sinteza i analiza maloiskazhayushchikh ustroystv silovoi elektroniki dlya elektrotekhnicheskikh kompleksov avtonomnykh ob'ektov* (Methodology of structural and algorithmic synthesis and analysis of weakly distorting power electronics units for electrical systems of Autonomous objects), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2001, 432 p.
3. Golovatskii V.A., Gulyakovich G.N., Konev Yu.I. *Istochniki vtorichnogo elektropitaniya* (Secondary power sources), Moscow, Radio i svyaz', 1990, 280 p.
4. Konev Yu.I. *Elektropitanie. Nauchno-tekhnicheskii sbornik*, Moscow, 1993, no. 1, pp. 5-15.
5. Shchetinin V.E., Averin S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 159-167.
6. Shchetinin V.E., Averin S.V. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2016, no. 62, pp. 35-43.