

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДВУХ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Н.Н. Лопаткин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет имени В.М. Шукшина», ул. Короленко, 53, Бийск, Алтайский край, 659333, Россия. E-mail: nikolay_lopatkin@mail.ru

Предложен один из вариантов реализации алгоритма пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции двух линейных напряжений многоуровневого автономного инвертора напряжения, использующий пятисегментную последовательность переключения трех векторов. В результате моделирования в Mathcad получены графики зависимостей от глубины модуляции коэффициента гармоник и интегральных коэффициентов гармоник выходного напряжения для различных значений кратности коммутации. Библ. 4, рис. 5.

Ключевые слова: инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, пространственно-векторная модуляция, косоугольные координаты, коэффициент гармоник напряжения, интегральные коэффициенты гармоник напряжения.

Трехфазные многоуровневые инверторы напряжения (МУИН) являются востребованным решением для высоковольтного частотно-регулируемого электропривода, систем передачи электроэнергии и других приложений, позволяющим не повышать требования к используемым силовым ключам по предельному напряжению. Многообразие схем, методов и алгоритмов управления МУИН [2] дает возможность оптимального, с точки зрения конкретного приложения, сочетания качества выходного напряжения, КПД и себестоимости реализуемого технического решения.

Одним из подходов к использованию пространственно-векторной модуляции (ПВМ) выходного напряжения, существенно упрощающим алгоритм и сокращающим время его выполнения по сравнению с главными вариантами алгоритмов ПВМ [2] при сохранении основных параметров МУИН, является рассмотрение линейных (межфазных) напряжений как задаваемых и обрабатываемых величин [3]. В рамках данного подхода выявлены роли целых $\lfloor u_{xy}^* \rfloor$ и дробных $\{u_{xy}^*\}$ частей относительных мгновенных значений линейных напряжений u_{xy}^* , соответственно как координат и относительных длительностей действия векторов, ближайших к заданному пространственному вектору (ЗПВ), и предложены некоторые новые алгоритмы его реализации [4]. Здесь и далее $u_{xy}^* = u_{xy} / U_d$, U_d – входное постоянное напряжение.

Целью данной работы является получение моделированием в виде непрерывных графиков и оценка зависимостей от глубины модуляции интегральных коэффициентов, характеризующих гармонический состав выходного напряжения МУИН для предлагаемого варианта реализации ПВМ с заданием и формированием двух линейных напряжений.

Качество выходного напряжения напрямую зависит не только от базового алгоритма, но также и от выбранной последовательности переключения трех ближайших векторов (ТБВ) на такте широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Рассмотрим здесь один из возможных вариантов пятисегментного разбиения времен действия ТБВ на такте ШИМ. Предлагаемая последовательность переключения на такте выполняемых векторов (ВПВ), обеспечивающая полуволновую симметрию кривой выходного напряжения, соответствует траектории движения ВПВ на рис. 1. Используемая координатная система (косоугольных 60-градусных координат) с указанием относительных длительностей действия четырех векторов, ближайших к ЗПВ, показана на рис. 2.

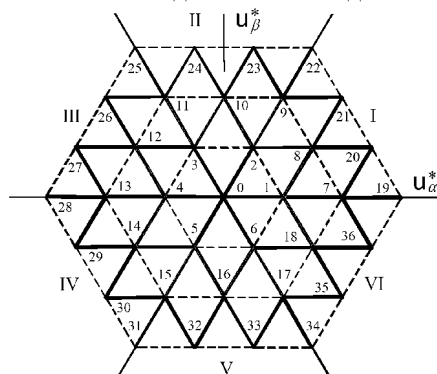


Рис. 1

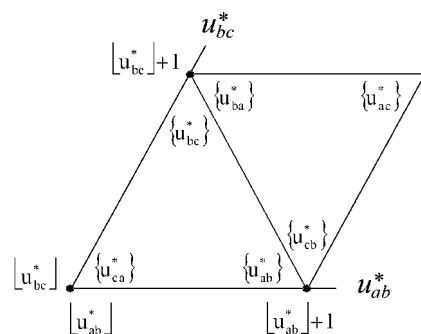


Рис. 2

Набор последовательностей выполняемых векторов (согласно нумерации рис. 1) для первого кольца модуляционных треугольников следующий: {1-0-2-0-1, 2-0-3-0-2, 3-0-4-0-3, 4-0-5-0-4, 5-0-6-0-5, 6-0-1-0-6}. С появлением во втором кольце треугольников, указывающих вниз, траектория движения конца ВПВ становится зигзагообразной. Здесь в секторе I имеем набор {7-1-8-1-7, 1-8-2-8-1, 8-2-9-2-8}. Тот же порядок сохраняется при любых переходах к следующим секторам. Поэтому для сектора II выполняем набор {9-2-10-2-9, 2-10-3-10-2, 10-3-11-3-10} и так далее.

Как можно видеть, при каждом переходе к следующему кольцу треугольников в каждом секторе добавляется по два треугольника разных типов, что сохраняет как траекторию движения конца ВПВ внутри треугольника каждого из двух типов, так и тип начального и конечного треугольника в каждом секторе.

В соответствии с рис. 2 генерируемое выходное линейное напряжение u_{EXExy}^* на такте k ШИМ с текущим от начала такта временем t_c может быть представлено в виде

$$u_{kEXExy}^*(t_c) = \lfloor u_{kSxy}^* \rfloor + f_{kEXExy}(t_c), \quad (1)$$

где отсчитываемые на такте значения u_{kSxy}^* задаваемых напряжений u_{xy}^* соответствуют середине такта,

$$u_{kSab}^* = m_a \sin((2\pi k - \pi)/m_f + 2\pi/3), \quad u_{kSbc}^* = m_a \sin((2\pi k - \pi)/m_f), \quad (2)$$

m_a – глубина модуляции, $m_a = U_{\Delta m}/U_d = U_{\Delta m}^*$, $U_{\Delta m}$ – амплитуда задаваемого линейного напряжения, m_f – кратность коммутации ШИМ, $m_f = f_c / f$; f_c и f – частоты тактовая и задаваемая выходная соответственно; функция f_{EXExy} имеет смысл дробной части мгновенного значения выполняемого линейного напряжения u_{EXExy}^* и принимает значения 0 и 1, ее среднее на такте значение $\bar{f}_{kEXExy}$, естественно, соответствует дробной части мгновенного значения задаваемого напряжения u_{xy}^*

$$\bar{f}_{kEXExy} = \lfloor u_{kSxy}^* \rfloor. \quad (3)$$

Суммарные на такте относительные длительности действия каждого из ТБВ определяются дробными частями отсчетов модулирующих сигналов $\lfloor u_{kSab}^* \rfloor$ и $\lfloor u_{kSbc}^* \rfloor$ [4]. Разбиение и позиционное комбинирование на такте импульсов действия ТБВ (одного из двух треугольников ромба рис. 2) определяются принятой последовательностью переключения, а значит, времени начала и окончания единичных импульсов на такте и функции f_{EXEab} и f_{EXEbc} в целом зависят от номера сектора и типа треугольника ТБВ, в котором в данный момент находится ЗПВ. Индикаторами треугольников, указывающих, соответственно, вверх и вниз, служат функции

$$F_{\Delta k} = (\text{sgn}(1 - \lfloor u_{kSab}^* \rfloor - \lfloor u_{kSbc}^* \rfloor) + 1)/2, \quad F_{\nabla k} = 1 - F_{\Delta k}. \quad (4)$$

Моделирование в Mathcad выполнено с поинтервальным заданием формируемой функции u_{EXEab}^* и ее коэффициентов Фурье для k от 1 до m_f , с посекторными обобщениями. Соответствующая предложенной пятизвенной последовательности переключения трех векторов временная диаграмма генерируемого напряжения для значения $m_f = 18$ при $m_a = 3,5$ представлена на рис. 3, а зависимости от глубины модуляции его коэффициента гармоник $K_{\Gamma n}$ (КГ) и интегральных коэффициентов гармоник $\bar{K}_{\Gamma n}^{(1)}$ и $\bar{K}_{\Gamma n}^{(2)}$ (ИКГ) [1] порядков 1 и 2 для ряда значений m_f – соответственно на рис. 4 и рис. 5, а и б.

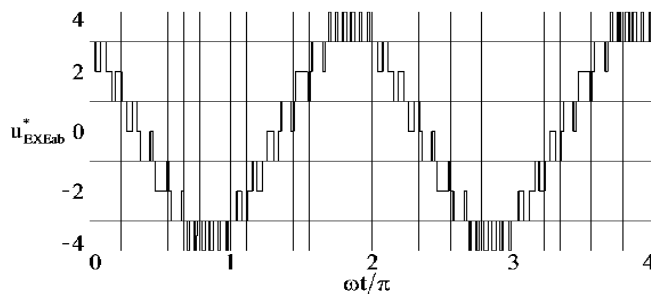


Рис. 3

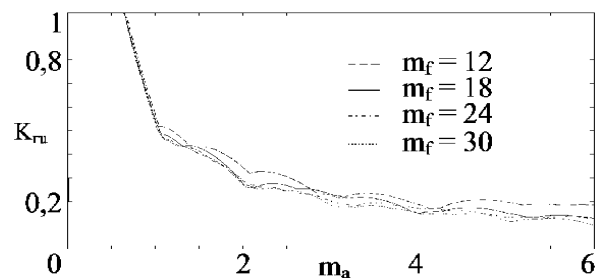


Рис. 4

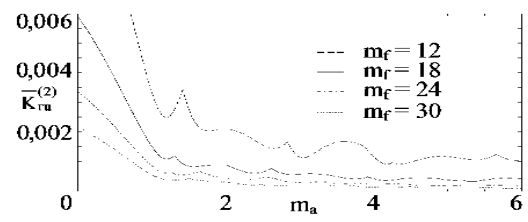
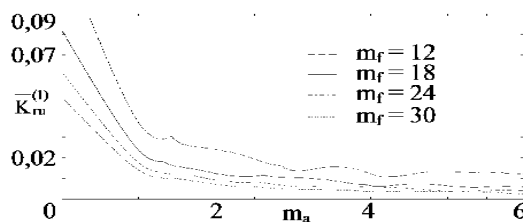


Рис. 5, а, б

ИКГ $\overline{K}_{\Gamma n}^{(q)}$ порядка q производит взвешенное (по номеру n) суммирование гармоник, моделирующее фильтрующее действие АЧХ идеализированной электрической цепи порядка q [1].

Следует отметить, что выбор ключевых состояний ВПП, т.е. конкретных сочетаний выполняемых фазных напряжений, может производиться простым способом, описанным в [3].

Кривая линейного напряжения обладает симметрией на такте и полуволновой симметрией на периоде выходной частоты благодаря последней четные гармоники в выходных напряжениях МУИН отсутствуют.

Выводы. Представлена реализация ПВМ с формированием двух линейных напряжений, где значения целых и дробных частей отсчетов двух сигналов задания определяют координаты и относительные длительности действия векторов, при частном варианте последовательности переключения векторов. Выполнено моделирование в Mathcad и получены графики зависимостей от глубины модуляции m_a коэффициента гармоник и двух интегральных коэффициентов гармоник младших порядков выходного напряжения МУИН с учетом гармоник до $n = 1000$ для четырех значений кратности коммутации m_f . Приемлемое качество напряжения наблюдается при $m_a > 1$. Повышение m_f существенно снижает значения ИКГ, что для ИКГ первого порядка в нашем случае означает повышение качества тока каждой из фаз активно-индуктивной нагрузки, подсоединяемой к МУИН треугольником (пропорциональное снижение его КГ [1]). Описанный подход с простыми вычислениями по (1)...(4) позволяет применить практически любую стратегию переключения трех ближайших векторов.

1. *Зиновьев Г.С.* Силовая электроника. – Москва: Юрайт, 2012. – 667 с.
2. *Holmes D.G., Lipo T.A.* Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. – Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003.
3. *Celanovic N., Boroyevich D.* A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37. – No 2. – Pp. 637-641.
4. *Lopatkin N.N.* Some new representations of the multilevel inverter voltage space vector in the complex plane // Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015), Omsk, Russia. – 2015. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR.

УДК 621.341.572

МОДЕЛЮВАННЯ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ БАГАТОРІВНЕВОГО ІНВЕРТОРА З ПРОСТОРОВО-ВЕКТОРНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ДВОХ ЛІНІЙНИХ НАПРУГ

Н.Н. Лопаткин

Федеральна державна бюджетна освітня установа вищої освіти

«Алтайський державний гуманітарно-педагогічний університет імені В.М. Шукшина»,

вул. Короленка, 53, Бійськ, Алтайський край, 659333, Росія. E-mail: nikolay_lopatkin@mail.ru

Запропоновано один із варіантів реалізації алгоритму просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції двох лінійних напруг багаторівневого автономного інвертора напруги, що використовує п'яти сегментну послідовність перемикання трьох векторів. У результаті моделювання в Mathcad отримано графіки залежностей від глибини модуляції коефіцієнта гармонік і інтегральних коефіцієнтів гармонік вихідної напруги для різних значень кратності комутації. Бібл. 4, рис. 5.

Ключові слова: інвертор напруги, широтно-імпульсна модуляція, просторово-векторна модуляція, косокутні координати, коефіцієнт гармонік напруги, інтегральні коефіцієнти гармонік напруги.

OUTPUT VOLTAGE SIMULATION OF MULTILEVEL INVERTER WITH SPACE VECTOR MODULATION OF TWO DELTA VOLTAGES

N.N. Lopatkin

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “The Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University”,

Korolenko, 53, Biysk, Altai region, 659333, Russia. E-mail: nikolay_lopatkin@mail.ru

One of the implementation variants of the algorithm of the space vector pulse-width modulation of the two delta voltages of the multilevel autonomous voltage source inverter, using the five-segment sequence of the three vectors switching is offered. The diagrams of the dependences of the output voltage THD and integral factors of harmonics on the amplitude modulation index are obtained for the various values of the frequency modulation index as a result of Mathcad simulation. References 4, figures 5.

Key words: voltage source inverter, PWM, space vector modulation, oblique-angled coordinates, voltage THD, integral factors of voltage harmonics.

1. *Zinoviev G.S.* Power Electronics. – Moscow: Jurajt. – 2012. – 667 p. (Rus.)
2. *Holmes D.G., Lipo T.A.* Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003.
3. *Celanovic N., Boroyevich D.* A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37. – No 2. – Pp. 637-641.
4. *Lopatkin N.N.* Some new representations of the multilevel inverter voltage space vector in the complex plane // Proc. SIBCON-2015, 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russia. – 2015. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1, 222em.pdf.

Надійшла 25.01.2016

