

СИНТЕЗ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

SYNTHESIS OF CONTROL SIGNALS OF THREE-LEVEL INVERTERS IN REAL TIME

**D. Melnikov
N. Vrublevsky
M. Petrovichev**

Summary. High power applications such as AC drive require a high quality inverter output with low harmonic loss and low torque ripple. Reducing the harmonic content in the output current of the inverter is achieved mainly by increasing the switching frequency of the keys, which in turn leads to an increase in dynamic losses on the transistors. In this work, this problem is solved by using a three-level inverter using the control signal synthesis algorithm, in a simplified way. The algorithm makes it possible to implement space-vector and sinusoidal pulse-width modulation (PWM) in real time. It is based on the simplification of the space-vector diagram of a three-level inverter to a two-level inverter. When simplified by the proposed method, all other procedures required for a three-level PWM are performed as for a conventional two-level inverter, and the execution time is significantly reduced. The problem of controlling the potential of the neutral point of the DC link is implemented without computational costs. Neutral point potential control is already built into the procedure for calculating the opening (closing) time intervals of transistors, and is a P-regulator. The proposed method can be applied to multi-level inverters above three-level. The reliability of the proposed algorithm for synthesizing control signals of three-level inverters is confirmed by a computational experiment.

Keywords: algorithm, inverter, microcontroller, reference voltage, gating, control, pulse width modulation.

Мельников Дмитрий Владимирович

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
melnikov-dv@yandex.ru

Врублевский Николай Федорович

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
vrublevsky_nf@bmstu.ru

Петровичев Максим Александрович

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
tabblif@yandex.ru

Аннотация. Для мощных приложений, таких как привод переменного тока, необходим высококачественный выход инвертора с низкими гармоническими потерями и пульсациями крутящего момента. Снижение содержания гармоник в выходном токе инвертора достигается главным образом за счет повышения частоты переключения ключей, что в свою очередь приводит к повышению динамических потерь на транзисторах. В работе эта проблема решается путем использования трехуровневого инвертора с использованием алгоритма синтеза сигналов управления, упрощенным способом. Алгоритм позволяет реализовать пространственно-векторную и синусоидальную широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) в реальном масштабе времени. В его основе лежит упрощение пространственно-векторной диаграммы трехуровневого инвертора до двухуровневого инвертора. При упрощении предложенным методом все остальные процедуры, необходимые для трехуровневой ШИМ, выполняются как для обычного двухуровневого инвертора, а время выполнения значительно сокращается. Проблема управления потенциалом нейтральной точки звена постоянного тока реализуется без вычислительных затрат. Контроль потенциала нейтральной точки уже встроено в процедуру расчета временных интервалов открытия (закрытия) транзисторов, и представляет собой P-регулятор. Предлагаемый метод может быть применен к многоуровневым инверторам выше трехуровневого. Достоверность предложенного алгоритма синтеза сигналов управления трехуровневых инверторов подтверждается вычислительным экспериментом.

Ключевые слова: алгоритм, инвертор, микроконтроллер, опорное напряжение, стробирование, управление, широтно-импульсная модуляция.

Благодаря развитию элементной базы силовой электроники, значительно увеличилось требование к высоковольтным приложениям. Для высокопроизводительных систем привода переменного тока с повышенным уровнем мощности необходим высококачественный выход инвертора с низкими гармоническими потерями и пульсациями крутящего момента. В случае традиционной двухуровневой конфигурации инвертора снижение содержания гармоник в выходном токе инвертора достигается главным образом за счет повышения частоты переключения ключей.

Однако в областях применения с высоким напряжением и большой мощностью частота переключения силовых ключей должны быть ограничена на уровне 1–2 кГц даже для современной элементной базы из-за повышенных коммутационных потерь. Таким образом, подавление гармоник за счет повышенной частоты переключения двухуровневого инвертора становится более сложным в приложениях большой мощности. Кроме того, поскольку напряжение звена постоянного тока двухуровневого инвертора ограничено номинальным напряжением коммутационных устройств,

Таблица 1. Состояния коммутации и напряжение на терминалах (клеммах) трехуровневого преобразователя ($x = a, b, c$)

Состояние фаз	Состояние ключей				Напряжение на клеммах фаз
	K_{1x}	K_{2x}	K_{3x}	K_{4x}	
P	Вкл.	Вкл.	Выкл.	Выкл.	$U_{dc} / 2$
O	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.	0
N	Выкл.	Выкл.	Вкл.	Вкл.	$-U_{dc} / 2$

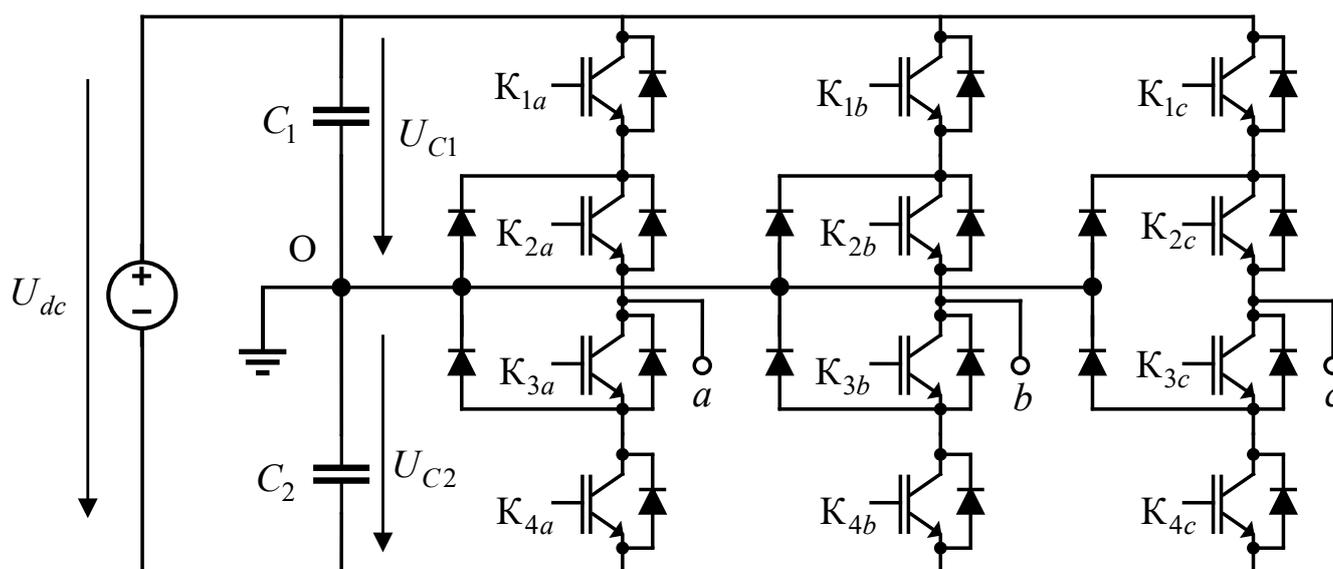


Рис. 1. Схема трехуровневого инвертора

для повышения напряжения звена постоянного тока требуется проблематичное последовательное соединение коммутационных устройств. При последовательном подключении максимально допустимая частота переключения должна быть еще ниже, таким образом, уменьшение гармоник становится более сложной задачей.

С точки зрения подавления гармоник и высокого уровня напряжения в звене постоянного тока трехуровневый подход к построению сигналов управления представляется наиболее многообещающей альтернативой [9]. Содержание гармоник трехуровневого инвертора меньше, чем у двухуровневого инвертора при той же частоте переключения, а блокирующее напряжение коммутационного устройства составляет половину напряжения в звене постоянного тока. Таким образом, топология трехуровневого инвертора обычно используется при реализации высокопроизводительных систем привода переменного тока высокого напряжения [2;5;9].

Однако, чтобы в полной мере использовать вышеупомянутые преимущества трехуровневого инвертора, необходимо эффективно подавлять колебания потенциала нейтральной точки, присущие трехуровневному инвертору. Для решения проблемы потенциального дисбаланса нейтральной точки было предложено ряд стратегий широтно-импульсной модуляции [1;3;4]. Многие из них сосредоточены в основном на методе управления потенциалом нейтральной точки, но при этом используют сложный расчет времени переключения (временных интервалов открытия и закрытия ключей) и метод выбора последовательности переключений ключей.

В этой статье предлагается простой метод широтно-импульсной модуляции трехуровневого инвертора. Используя новую стратегию ШИМ, расчет времени переключения и выбор последовательности переключения выполняются так же легко, как и в обычном двухуровневом инверторе. Алгоритм управления напряжением в нейтральной точке может быть легко реализован.

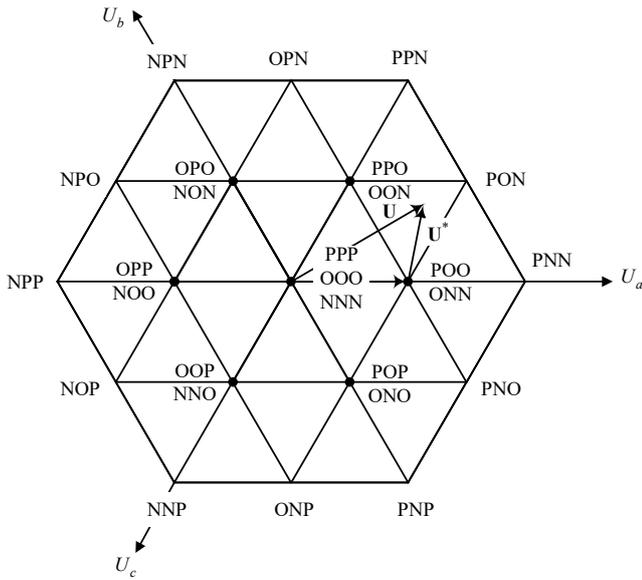


Рис. 2. Пространственно-векторная диаграмма трехуровневого инвертора

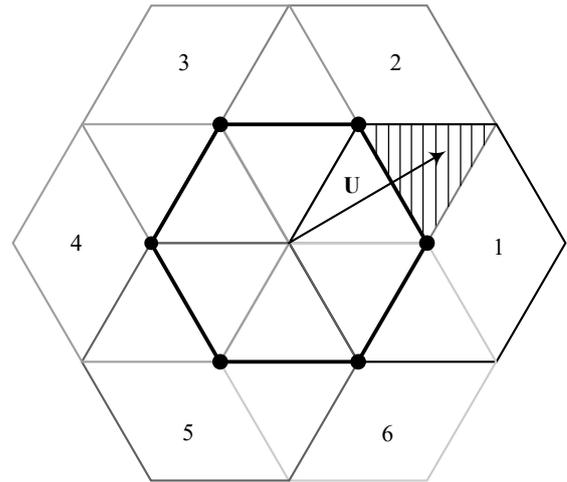


Рис. 3. Упрощение трехуровневой пространственно-векторной диаграммы

Предложенный алгоритм синтеза сигналов управления трехуровневыми инверторами в реальном масштабе времени реализуется с помощью вычислительного эксперимента.

Основные принципы предлагаемого метода пространственно-векторной ШИМ

На рисунке 1 представлена принципиальная схема трехуровневого инвертора, а состояния переключения каждой фазы инвертора перечислены в таблице 1. В каждой фазе может быть три вида состояния переключения: P, O и N, поэтому существует 27 коммутационных состояний в трехфазном трехуровневом инверторе.

Используя пространственно-векторную диаграмму трехуровневого инвертора, можно объяснить основной принцип предлагаемого метода ШИМ. Пространственно-векторную диаграмму трехуровневого инвертора, показанную на рисунке 2, можно считать состоящей из шести маленьких шестиугольников, которые являются пространственно-векторными диаграммами обычных двухуровневых инверторов. Каждый из этих шести шестиугольников, составляющих пространственно-векторную диаграмму трехуровневого инвертора, имеет центры на шести вершинах внутреннего малого шестиугольника, как показано на рисунке 3. Таким образом, если эти шесть малых шестиугольников сместить к центру, то пространственно-векторная диаграмма трехуровневого инвертора упрощается до двухуровневого инвертора.

Для упрощения пространственно-векторной диаграммы двухуровневого инвертора необходимо выполнить следующие два шага. Во-первых, исходя из местоположения заданного опорного напряжения, необходимо выбрать один шестиугольник из шести шестиугольников. Во-вторых, исходный вектор опорного напряжения должен быть вычтен на величину центрального вектора напряжения выбранного шестиугольника. С помощью этих двух шагов трехуровневая пространственно-векторная плоскость преобразуется в двухуровневую пространственно-векторную плоскость.

Затем определение последовательности переключений и вычисление времени длительности вектора напряжения выполняются обычным двухуровневым методом ШИМ. Поскольку предлагаемый метод ШИМ в принципе аналогичен обычному двухуровневому, алгоритмы, используемые в двухуровневом ШИМ, также могут быть применены к этому предлагаемому методу.

Коррекция вектора опорного напряжения

Опишем первый этап упрощенного трехуровневого пространственно-векторного метода ШИМ. По положению заданного опорного вектора напряжения выбирается один шестиугольник из шести малых шестиугольников, составляющих трехуровневую пространственно-векторную диаграмму. Вектор опорного напряжения должен оставаться внутри выбранного шестиугольника. Эта процедура делит трехуровневую пространственно-векторную диаграмму на шесть областей, которые покрывают

ся каждым маленьким шестиугольником, как показано на рисунке 3. Значение на рисунке 3 представляет выбранный шестиугольник. На трехуровневой пространственно-векторной диаграмме существуют области, которые перекрываются соседними маленькими шестиугольниками. Таким образом, если вектор опорного напряжения остается в этих областях, он может иметь любые возможные значения. Рисунок 3 иллюстрирует два возможных способа выбора значения (значение в заштрихованной области может иметь значение 1 или 2).

Как только значение определено, начало вектора опорного напряжения изменяется на центральный вектор напряжения выбранного шестиугольника. Это делается путем вычитания вектора центра выбранного шестиугольника из исходного опорного вектора, как показано на рисунке 2: U — вектор исходного опорного напряжения, а U^* — скорректированный вектор опорного напряжения, видимый из местоположения вектора (POO), (ONN).

Все сказанное можно, на примере программы, обобщить следующим образом:

```

if ( $U_a \cdot U_b \cdot U_c \geq 0$ )
  if  $U_a \geq 0$ , и.ш.=1; a=2; b= -1; (где и.ш.— индекс шестиугольника)
  elseif  $U_b \geq 0$ , и.ш.=3; a= -1; b= 2;
  else и.ш.=5; a= -1; b= -1;
  end
else
  if  $U_a < 0$  и.ш.=4; a= -2; b=1;
  elseif  $U_b < 0$ , и.ш.=6; a=1; b= -2;
  else и.ш.=2; a=1; b=1;
  end
end
 $U_a^* = U_a - aU_{dc}/6$ ;  $U_b^* = U_b - bU_{dc}/6$ ;
 $U_c^* = U_a^* - U_b^*$  (или  $U_c^* = U_c - (a + b)U_{dc}/6$ ).
    
```

где U_a^*, U_b^*, U_c^* — составляющие нового вектора опорного напряжения.

Расчет времени переключения

Если вектор опорного напряжения переопределяется, как описано выше, время переключения рассчитывается так же, как и в обычном двухуровневом методе, который подробно изложен в [3]. Расчет времени коммутации может быть выполнен более эффективно с помощью метода, представленного в [7], как показано в следующем примере. При расчете времени пребывания единственная разница между двухуровневым ШИМ и трехуровневым ШИМ заключается в коэффициенте 2, появляющемся в первых двух строках следующего примера.

Расчет мнимого время переключения:

$$T_{ап} = 2U_a^*T_B/U_{dc}; T_{бп} = 2U_b^*T_B/U_{dc}; T_{сп} = 2U_c^*T_B/U_{dc}.$$

T_B — обозначает время выборки $T_B = 0,5T_{ШИМ}$,
 $T_{ШИМ}$ — период ШИМ.

Эффективное время может быть определено как продолжительность времени между наименьшим и наибольшим из трех мнимых времен переключения, как указано [7]

$$T_{эф} = T_{макс} - T_{мин},$$

где

$$T_{мин} = \min(T_{ап}, T_{бп}, T_{сп}), T_{макс} = \max(T_{ап}, T_{бп}, T_{сп}).$$

Если время переключения рассчитывается, необходимо определить последовательность переключений. Однако последовательность переключений определяется автоматически значением и.ш. (индекс шестиугольника). То есть, на основе вектора центрального напряжения выбранного шестиугольника последовательность переключений определяется как у обычного двухуровневого инвертора. Например, в случае рисунка 2 последовательность переключения будет (POO) — (PON) — (OON) — (ONN). Если вектор (ONN) выбран в качестве базового и приняты обозначения, используемые в двухуровневой пространственно-векторной диаграмме [моя статья], последовательность переключений может быть выражена как (111) — (110) — (010) — (000). Эта последовательность переключения точно такая же, как у обычного двухуровневого ШИМ. Поэтому при определении последовательности переключений единственное, что нужно сделать, это выбрать переключатели, которые должны быть включены для изменения их состояний среди четырех переключателей в каждой фазе. Это реализуется с помощью простых логических элементов, использующих значение и.ш.

Как показано в [7] конкретную ШИМ можно определить с помощью, параметра $T_{см}$ (время смещения). В случае трехуровневых инверторов для синусоидальной ШИМ $T_{см}$ можно определить следующим образом:

$$\text{если и.ш. равен } 1, 3, 5, \text{ то } T_{см} = 0,25 \cdot T_{ШИМ} (1 + 1/3 - U_N),$$

$$\text{если и.ш. равен } 2, 4, 6, \text{ то } T_{см} = 0,25 \cdot T_{ШИМ} (1 - 1/3 - U_N),$$

$$U_N = \begin{cases} U_O, -1 \leq U_O \leq 1 \\ 1, U_O > 1 \\ -1, U_O < -1 \end{cases}, U_O = k_1(U_{C1} - U_{C2});$$

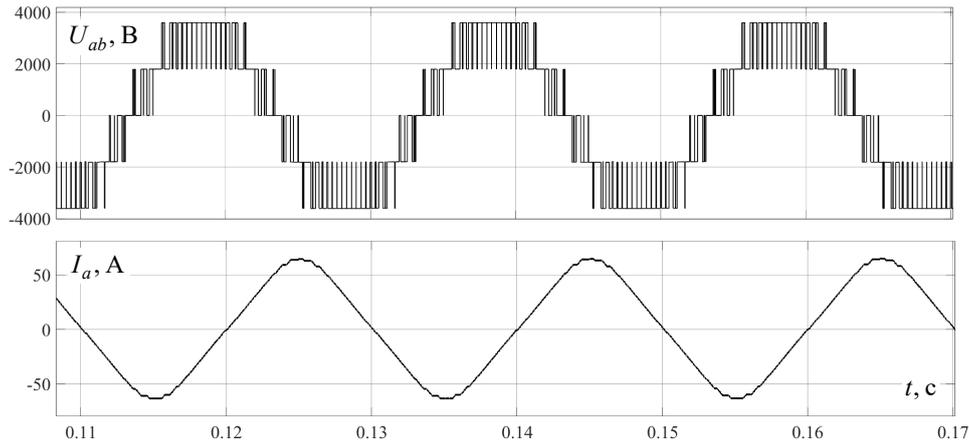


Рис. 4. Результаты вычислительного эксперимента инвертора с RL нагрузкой: линейное напряжение и фазный ток

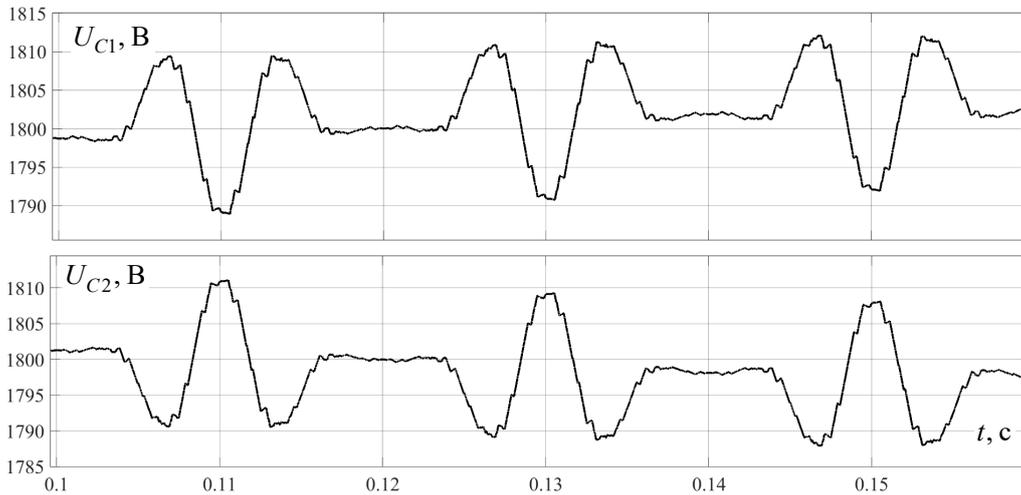


Рис. 5. Результаты вычислительного эксперимента инвертора с RL нагрузкой: напряжение на емкостях U_{C1} , U_{C2} .

k_I — коэффициент чувствительности изменения потенциала нейтральной точки. Последние выражения представляет собой П-регулятор с ограничением.

В случае использования пространственно-векторной ШИМ величину T_{CM} можно вычислить так:

$$T_{CM} = (0,25T_{ШИМ} - 0,5T_{эф})(1 - U_N) - T_{мин}.$$

Далее по аналогии с [7] можно определить времена стробирования:

- ♦ для последовательности «выключения» на интервале $0,5T_{ШИМ}$:
 $T_{ca_вык0,5} = T_{ап} + T_{CM}$, $T_{cb_вык0,5} = T_{бп} + T_{CM}$,
 $T_{cc_вык0,5} = T_{сп} + T_{CM}$;

- ♦ для последовательности «включения» в диапазоне как полупериода, так и периода $T_{ШИМ}$:

$$\begin{aligned} T_{ca_вк} &= 0,5T_{ШИМ} - T_{ca_вык0,5}, \\ T_{cb_вк} &= 0,5T_{ШИМ} - T_{cb_вык0,5}, \\ T_{cc_вк} &= 0,5T_{ШИМ} - T_{cc_вык0,5}. \end{aligned}$$

- ♦ для последовательности «выключения» в диапазоне всего цикла $T_{ШИМ}$:

$$\begin{aligned} T_{ca_вык} &= T_{ca_вык0,5} + 0,5T_{ШИМ}, \\ T_{cb_вык} &= T_{cb_вык0,5} + 0,5T_{ШИМ}, \\ T_{cc_вык} &= T_{cc_вык0,5} + 0,5T_{ШИМ}. \end{aligned}$$

Для гарантированного использования полного напряжения звена постоянного тока, фактическая дли-

тельность стробирующего импульса должна быть ограничено значением:

$$0 < T_{ca_вк}, T_{cb_вк}, T_{cb_вк} < 0,5T_{ШИМ}, \\ 0,5T_{ШИМ} < T_{ca_вык}, T_{cb_вык}, T_{cc_вык} < T_{ШИМ}.$$

Как видно, в предлагаемом алгоритме синтеза сигналов управления трехуровневых инверторов, контроль потенциала нейтральной точки уже встроен в процедуру расчета фактического времени стробирования, что очень удачно сочетается с концепцией «эффективного времени». Существуют и другие методы контроля потенциала нейтральной точки для трехуровневых инверторов: изменение последовательности переключения, изменение временного распределения избыточных векторов напряжения. Но они не очень эффективны при реализации на контроллерах в реальном масштабе времени, т.к. их суть водится к перерасчету длительностей стробирующих импульсов. В нашем случае путем изменения параметра $T_{см}$, мы можем не только в реальном времени изменять метод ШИМ, но и путем встроенного П-регулятора в его расчет, контролировать потенциал нейтральной точки.

Предложенный алгоритм синтеза сигналов управления трехуровневых инверторов в реальном масштабе времени оптимально использовать на цифровых сиг-

нальных контроллерах для управления приводами. Эти контроллеры, обладают следующими свойствами: команды, оптимизированные для управления, цифровой обработки, матричных операций [6;8]; компактный ассемблерный и Си-код; простота программирования; высокая производительность и расширенное адресное пространство.

Предлагаемый метод также применим к многоуровневому ШИМ выше трехуровневого. Например, четырех- или пятиуровневая пространственно-векторная диаграмма может быть упрощена до трехуровневой пространственно-векторной диаграммы на тех же принципах.

Результаты вычислительных экспериментов синтеза сигналов управления для трехуровневых инверторов представлены на рисунках 4, 5. В качестве нагрузки инвертора использовалась трехфазная RL цепь с соединением типа «звезда» при напряжении постоянного звена 3600 В. Частота ШИМ 1,5 кГц.

Из результатов вычислительного эксперимента видно, что предлагаемый алгоритм синтез сигналов управления трехуровневых инверторов в реальном масштабе времени позволяет на низких частота ШИМ подавить высокие гармоники тока, а баланс напряжения в звене постоянного тока достаточно хорошо контролируется.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.S. Hyun, "A Novel PWM Scheme for a Three-Level Voltage Source Inverter with GTO thyristors," in Proc. IAS Conf. — 1994. — pp. 1151–1157.
2. J.H. Suh, "A design of a new snubber circuit for three-level gate turn-off thyristor inverters," in Proc. EPE Conf. — 1995. — pp. 573–578.
3. J.S. Kim, "A novel voltage modulation technique of the space vector PWM," Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn. — 1996, vol. 116-D, no. 8 — pp. 820–825.
4. R. Jotten, "A fast space-vector control for a three-level voltage source inverter," in Proc. EPE Conf. — 1991. — pp. 70–75.
5. Владислав Филатов. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT. Перспективные решения // Силовая электроника — 2012. — № 4.
6. Мельников Д.В., Корнюшин П.Ю., Мин Ч. Ту., Чжо Ту.А., Окар М. Проекционно-матричный подход к анализу и синтезу систем управления электроэнергетических систем. Научное обозрение — 2015. — № 2 — С. 88–97.
7. Мельников Д.В., Петровичев М.А. Реализация сигналов управления трехфазного инвертора в реальном масштабе времени с помощью унифицированной ШИМ // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки — 2022. — № 12–2 — С. 103–112.
8. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Лукашенко Ю.Л., Мельников Д.В., Рыбин В.М., Трофимов А.И. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров. // М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана — 2007. — 664 с.
9. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты // Екатеринбург: УРО РАН — 2000. — 654 с.

© Мельников Дмитрий Владимирович (melnikov-dv@yandex.ru),

Врублевский Николай Федорович (vrublevsky_nf@bmstu.ru), Петровичев Максим Александрович (tabblif@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»