

АЛГОРИТМ СМЕНЫ ШАБЛОНОВ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ КЛЮЧЕЙ ТРЁХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

Тао Цзин, А.А. Радионов, А.С. Маклаков

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Предложен алгоритм смены шаблонов углов переключений ключей трёхуровневого преобразователя при широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник. Алгоритм позволяет осуществить выбор необходимого шаблона углов переключений в зависимости от изменения частоты выходного напряжения преобразователя. Решена задача смены шаблонов углов переключений ШИМ с удалением выделенных гармоник при не более одной коммутации полупроводниковых модулей преобразователя. Подробно рассмотрены структурная схема и блок-диаграмма предложенного алгоритма. Представлены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность алгоритма и демонстрирующие формирование переменной частоты выходного напряжения трёхуровневого преобразователя и смены шаблонов углов переключений без бросков и колебаний тока во время переключений. Реализованный алгоритм может быть легко адаптирован под задачи смены других методов широтно-импульсной модуляции.

Ключевые слова: преобразовательная техника, широтно-импульсная модуляция, удаление выделенных гармоник, шаблон углов переключений, трёхуровневый преобразователь.

Введение

Методы и алгоритмы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) силовых полупроводниковых преобразователей играют ключевую роль в снижении электрических потерь и повышении показателей качества преобразованной энергии. Развитие способов их усовершенствования имеет особую значимость для топологий высокоомощных многоуровневых преобразователей, применяемых в промышленных мехатронных системах, возобновляемой и распределённой энергетике [1–4].

С помощью хорошо известных методов ШИМ на основе сравнения опорного и задающего сигналов, а также пространственно-векторной ШИМ не удаётся достичь наилучших показателей качества преобразованных напряжений и токов и эффективности работы преобразователя. Альтернативой вышеупомянутым методам являются ШИМ с удалением выделенных гармоник и ШИМ с минимизацией суммарного индекса гармонического искажения, которые в основном применяются для управления переключением ключей активных выпрямителей напряжения. Последние два метода обладают существенными преимуществами при выборе углов переключений полупроводниковых модулей преобразователя и больше подходят для применений в области больших мощностей [4–7].

Существует несколько доступных топологий построения преобразователей в области высоких мощностей свыше мегаватта. Наиболее распространённой является трёхуровневая топология с выделенной средней точкой конденсатора звена постоянного тока. Такие преобразователи обычно

работают с низкой частотой переключения ключей для уменьшения динамических потерь при коммутации полупроводниковых модулей. Однако работа преобразователя на низкой частоте переключения приводит к ухудшению суммарного индекса гармонического искажения преобразованных токов и напряжений, что в итоге снижает эффективность. Таким образом, поиск разумного компромисса между низкими динамическими потерями и показателями качества преобразованной электроэнергии до сих пор остаётся одним из основных направлений исследований в области силовой преобразовательной техники [8–10].

Современное состояние проблемы исследования

Метод ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) был впервые представлен в [11] и затем дорабатывался многими исследователями [12–14], благодаря чему в настоящее время он прост в практической реализации и применим для различных топологий преобразователей. ШИМ с УВГ в основном используется при управлении активными выпрямителями ввиду того, что позволяет обеспечить требования к показателям качества электроэнергии в точке подключения преобразователя к сети переменного тока. Существует ряд исследований, показывающих возможность применить ШИМ с УВГ для управления автономными инверторами напряжения [15]. Для этого необходимо иметь несколько шаблонов углов переключений полупроводниковых модулей инвертора при формировании выходного напряжения в требуемом диапазоне частот.

Анализ приведенных выше работ показал, что в настоящее время в научной литературе не существует подробного рассмотрения вопроса реализации логики перехода между различными шаблонами переключений полупроводниковых модулей преобразователя.

Цель работы

В данной статье авторами будет разработан алгоритм смены шаблонов углов переключений ключей трёхуровневого преобразователя при ШИМ с УВГ при изменении частоты выходного напряжения. Главная задача данного алгоритма будет заключаться в обеспечении перехода между различными шаблонами углов переключений при ШИМ с УВГ, обеспечивая не более одного переключения полупроводниковых модулей преобразователя во время перехода.

Разработанный алгоритм будет включать девять шаблонов углов переключений ключей ШИМ с УВГ, где каждый определяется заданным диапазоном частот выходного напряжения. Предложенную авторами логику работы алгоритма планируется в будущем адаптировать для других задач управления преобразователями посредством ШИМ.

В статье будет представлена блок-диаграмма выбранного метода ШИМ с УВГ для трёхуровневого преобразователя, подробно рассмотрена стратегия переложенного алгоритма, показаны результаты моделирования и сделаны выводы по проделанной работе.

ШИМ с УВГ для трёхуровневого преобразователя

Метод ШИМ с УВГ позволяет исключить выбранные гармоники из выходного напряжения преобразователя посредством заранее рассчитанных шаблонов углов переключений α полупроводниковых модулей в зависимости от заданного уровня первой гармоники (коэффициента модуляции). Максимальное количество k выбранных гармоник, которые могут быть удалены, определяется допустимой частотой переключения полупроводниковых модулей $f_{sw,max}$ и заданным числом N углов переключений α в первой четверти периода выходного фазного напряжения преобразователя

$$k = \frac{f_{sw,max}}{2 \cdot f_1} - 1 = N - 1, \quad (1)$$

где f_1 – частота выходного фазного напряжения преобразователя.

На рис. 1 показана типовая форма мгновенных значений выходного фазного напряжения трёхуровневого преобразователя при ШИМ с УВГ с четвертьволновой симметрией, где N – число углов переключения α в первой четверти периода. Комбинации полупроводниковых ключей S_{a1} – S_{a4} формируют три уровня фазного напряжения трёхуровневого преобразователя, как показано в табл. 1: [P] – подключение к положительному полюсу «+», [O] – подключение к нейтральному полюсу «-» и [N] – подключение к отрицательному полюсу «-».

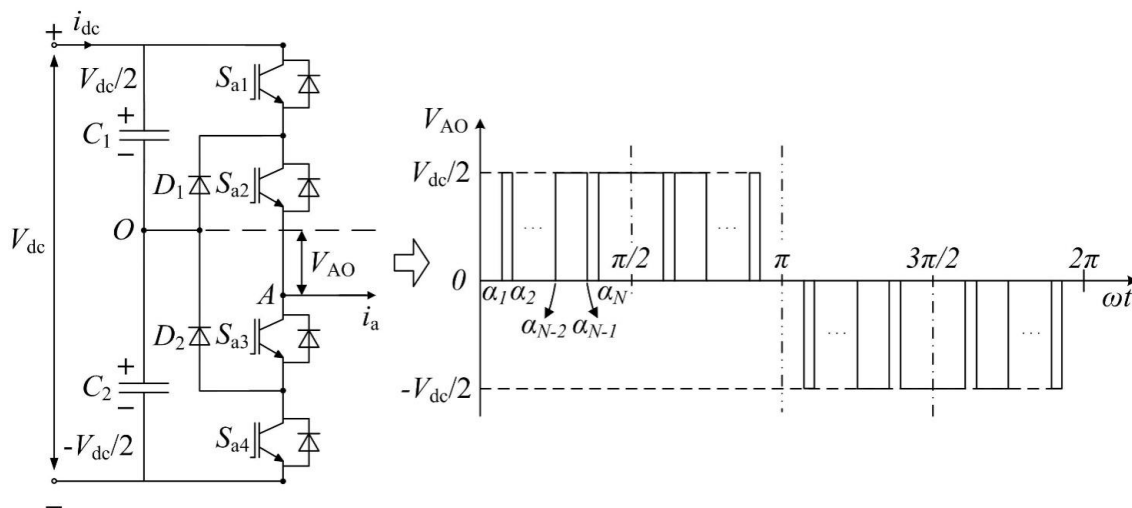


Рис. 1. Электрическая схема фазы трёхуровневого преобразователя и его форма выходного фазного напряжения с четвертьволновой симметрией (N – нечетное)

Таблица 1

Уровни фазного напряжения

Состояние	Включенные модули	Уровень напряжения
[P]	$[S_{a1} S_{a2} 0 0]$	$[V_{dc}]$
[O]	$[0 S_{a2} S_{a3} 0]$	$[0]$
[N]	$[0 0 S_{a3} S_{a4}]$	$[-V_{dc}]$

Ряд Фурье выходного фазного напряжения трёхуровневого преобразователя задается как

$$V_{AO}(\omega t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)], \quad (2)$$

где

$$A_n = \begin{cases} 0, & n = \text{even}, \\ \frac{4}{n\pi} \frac{V_{dc}}{2} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k), & n = \text{odd}, \end{cases} \quad (3)$$

$$B_n = 0,$$

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N < \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

Решение системы (2) осуществляется с помощью алгоритмов поиска целевой функции, например, методом Ньютона – Рафсона, генетическими алгоритмами, методом оптимизации роя частиц и т. п. [16–18]. Целевая функция задается как

$$\begin{cases} A_1(\alpha) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(\alpha_k) = M, \\ A_5(\alpha) = \frac{4}{5\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(5\alpha_k) = 0, \\ \vdots \\ A_n(\alpha) = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где коэффициент модуляции M определен

как $M = A_1 / (V_{dc} / 2)$ и углы переключения $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]$.

Алгоритм смены шаблонов углов переключений ключей трёхуровневого преобразователя при ШИМ с УВГ

1. Схема смены шаблонов углов переключений ШИМ с УВГ

На рис. 2 представлена используемая схема из девяти шаблонов углов переключений ШИМ с УВГ, которые выбираются согласно схеме на рис. 2, в зависимости от диапазона изменения частоты выходного фазного напряжения преобразователя f_1 . Частота переключения полупроводниковых модулей $f_{sw,max}$ ограничена на уровне 450 Гц. Каждому из девяти шаблонов ШИМ с УВГ определен частотный диапазон:

$$N = f(f_1) = \begin{cases} N = 3, & 75 \text{ Гц} \leq f_1, \\ N = 5, & 45 \text{ Гц} \leq f_1 < 75 \text{ Гц}, \\ N = 7, & 32,14 \text{ Гц} \leq f_1 < 45 \text{ Гц}, \\ N = 9, & 25 \text{ Гц} \leq f_1 < 32,14 \text{ Гц}, \\ N = 11, & 20,45 \text{ Гц} \leq f_1 < 25 \text{ Гц}, \\ N = 13, & 17,31 \text{ Гц} \leq f_1 < 20,45 \text{ Гц}, \\ N = 15, & 15 \text{ Гц} \leq f_1 < 17,31 \text{ Гц}, \\ N = 17, & 13,24 \text{ Гц} \leq f_1 < 15 \text{ Гц}, \\ N = 19, & 11,84 \text{ Гц} \leq f_1 < 13,24 \text{ Гц}. \end{cases} \quad (6)$$

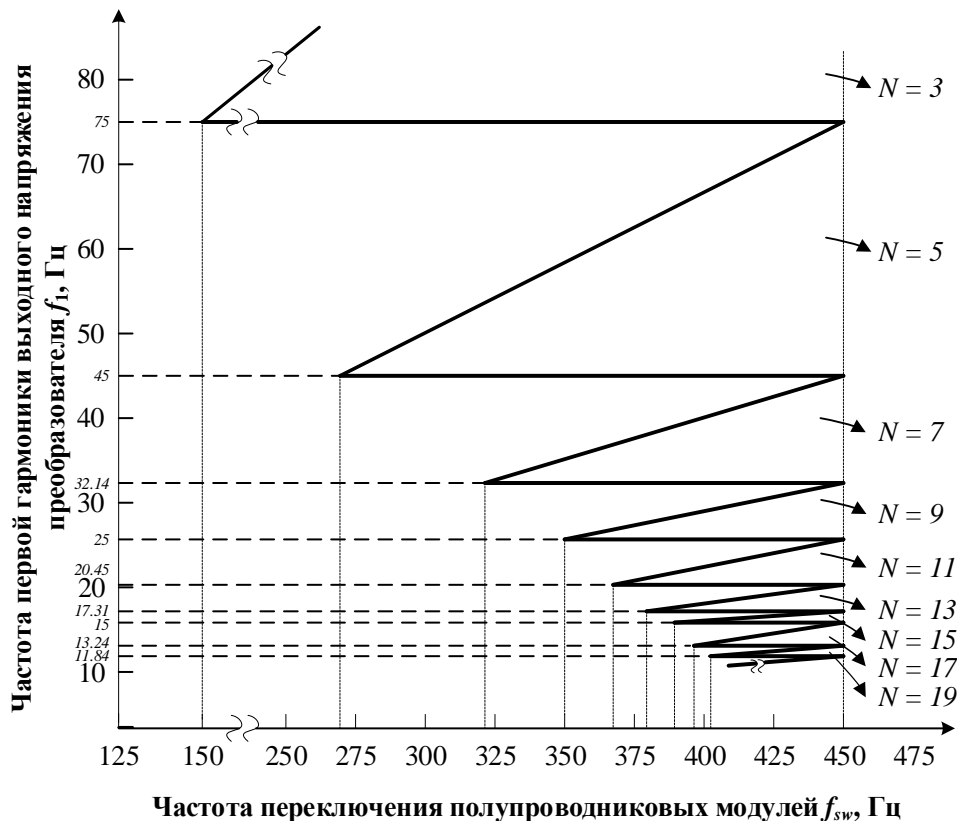


Рис. 2. Схема смены шаблонов углов переключений ШИМ с УВГ

2. Алгоритм перехода между шаблонами углов переключений

В основе предложенного алгоритма перехода между шаблонами углов переключений ШИМ с УВГ – обеспечить не более одного переключения полупроводниковых модулей преобразователя [19, 20]. Описание этапов работы алгоритма:

1. Коэффициент модуляции M и угол сдвига напряжения преобразователя от напряжения сети δ из системы управления преобразователем поступают на блок «ШИМ с УВГ», который формирует углы переключения, соответствующие текущему шаблону углов переключений (ТШУП) при заданной частоте выходного напряжения преобразователя f_1 согласно формуле (6) и рис. 2. В то же время блок «Оценка ТШУП» в зависимости от f_1 определяет номер ТШУП от 1 до 9 (определяется количеством шаблонов углов переключений (ШУП) ШИМ с УВГ):

$$\text{ТШУП} = f(N) = \begin{cases} 1, & N = 3, \\ 2, & N = 5, \\ 3, & N = 7, \\ 4, & N = 9, \\ 5, & N = 11, \\ 6, & N = 13, \\ 7, & N = 15, \\ 8, & N = 17, \\ 9, & N = 19. \end{cases} \quad (7)$$

2. Блок «Формирование сигнала смены ТШУП» фиксирует момент смены шаблона углов переключений ШИМ с УВГ, формируя при этом сигнал смены шаблона углов переключения (СШУП): [1] – смена шаблона, [0] – не меняем шаблон. Если СШУП – [0], то ТШУП не изменяется и работа алгоритма заканчивается. Сигнал СШУП сбрасывается в [0] после времени цикла работы блока T «Формирование предыдущего шаблона углов переключений (ПШУП)».

3. В случае если СШУП – [1], то последующий блок «Формирование предыдущего шаблона углов переключений (ПШУП)» запоминает номер

ТШУП и удерживает его в течение времени цикла работы блока T , формируя при этом сигнал предыдущего шаблона углов переключений (ПШУП):

$$\begin{aligned} \text{ПШУП} &= f(\text{ТШУП}, \text{СШУП}) = \\ &= \begin{cases} 1, & \text{ТШУП} = 1, \text{СШУП} = 1, \\ 2, & \text{ТШУП} = 2, \text{СШУП} = 1, \\ 3, & \text{ТШУП} = 3, \text{СШУП} = 1, \\ 4, & \text{ТШУП} = 4, \text{СШУП} = 1, \\ 5, & \text{ТШУП} = 5, \text{СШУП} = 1, \\ 6, & \text{ТШУП} = 6, \text{СШУП} = 1, \\ 7, & \text{ТШУП} = 7, \text{СШУП} = 1, \\ 8, & \text{ТШУП} = 8, \text{СШУП} = 1, \\ 9, & \text{ТШУП} = 9, \text{СШУП} = 1. \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

4. Сигнал ПШУП поступает на вход блока «Финальная смена ШУП» и блок «Сравнение ТШУП и ПШУП».

5. Блок «Сравнение ТШУП и ПШУП» сравнивает сигналы ТШУП и ПШУП, используя информацию об управляющих сигналах каждой фазы трёхуровневого преобразователя (например, $S_{a1} - S_{a4}$ для фазы А, как показано в табл. 1), формируемых каждым из девяти ШУП ШИМ с УВГ. В случае, если сравниваемые сигналы удовлетворяют условию возможности смены ШУП, на выходе блока «Сравнение ТШУП и ПШУП» формируется логический сигнал результата сравнения шаблонов углов переключений (РСШУП) – [1], если не удовлетворяет условиям, то РСШУП – [0] и ТШУП не изменяется и работа алгоритма заканчивается:

$$\text{РСШУП} = f(\text{ТШУП}, \text{ПШУП}) = \begin{cases} 0, \\ 1, \end{cases} \quad (9)$$

6. Затем три сигнала ТШУП, ПШУП и РСШУП поступают на вход блока «Смена ШУП», в котором формируется сигнал нового шаблона углов переключений (НШУП), который будет соответствовать ТШУП при выполнении следующих логических операций:

$$\text{НШУП} = f \left(\begin{matrix} \text{ТШУП}, \\ \text{ПШУП}, \\ \text{РСШУП} \end{matrix} \right) = \begin{cases} 1, & \text{ТШУП} = 1, \text{ПШУП} = 2 \text{ or } 3 \text{ or } 4 \text{ or } 5 \text{ or } 6 \text{ or } 7 \text{ or } 8 \text{ or } 9, \text{РСШУП} = 1, \\ 2, & \text{ТШУП} = 2, \text{ПШУП} = 1 \text{ or } 3 \text{ or } 4 \text{ or } 5 \text{ or } 6 \text{ or } 7 \text{ or } 8 \text{ or } 9, \text{РСШУП} = 1, \\ 3, & \text{ТШУП} = 3, \text{ПШУП} = 1 \text{ or } 2 \text{ or } 4 \text{ or } 5 \text{ or } 6 \text{ or } 7 \text{ or } 8 \text{ or } 9, \text{РСШУП} = 1, \\ 4, & \text{ТШУП} = 4, \text{ПШУП} = 1 \text{ or } 2 \text{ or } 3 \text{ or } 5 \text{ or } 6 \text{ or } 7 \text{ or } 8 \text{ or } 9, \text{РСШУП} = 1, \\ 5, & \text{ТШУП} = 5, \text{ПШУП} = 1 \text{ or } 2 \text{ or } 3 \text{ or } 4 \text{ or } 6 \text{ or } 7 \text{ or } 8 \text{ or } 9, \text{РСШУП} = 1, \\ 6, & \text{ТШУП} = 6, \text{ПШУП} = 1 \text{ or } 2 \text{ or } 3 \text{ or } 4 \text{ or } 5 \text{ or } 7 \text{ or } 8 \text{ or } 9, \text{РСШУП} = 1, \\ 7, & \text{ТШУП} = 7, \text{ПШУП} = 1 \text{ or } 2 \text{ or } 3 \text{ or } 4 \text{ or } 5 \text{ or } 6 \text{ or } 7 \text{ or } 9, \text{РСШУП} = 1, \\ 8, & \text{ТШУП} = 8, \text{ПШУП} = 1 \text{ or } 2 \text{ or } 3 \text{ or } 4 \text{ or } 5 \text{ or } 6 \text{ or } 7 \text{ or } 9, \text{РСШУП} = 1, \\ 9, & \text{ТШУП} = 9, \text{ПШУП} = 1 \text{ or } 2 \text{ or } 3 \text{ or } 4 \text{ or } 5 \text{ or } 6 \text{ or } 7 \text{ or } 8, \text{РСШУП} = 1. \end{cases} \quad (10)$$

7. После формирования НШУП алгоритм заканчивает работу и начинается новый цикл. Таким образом, новый шаблон углов переключений вступит в работу только в случае выполнения условий, указанных в пункте 2, 3, 5 и 6.

Для более наглядного представления описанного выше алгоритма на рис. 3 показана структурная схема и на рис. 4 – блок-схема.

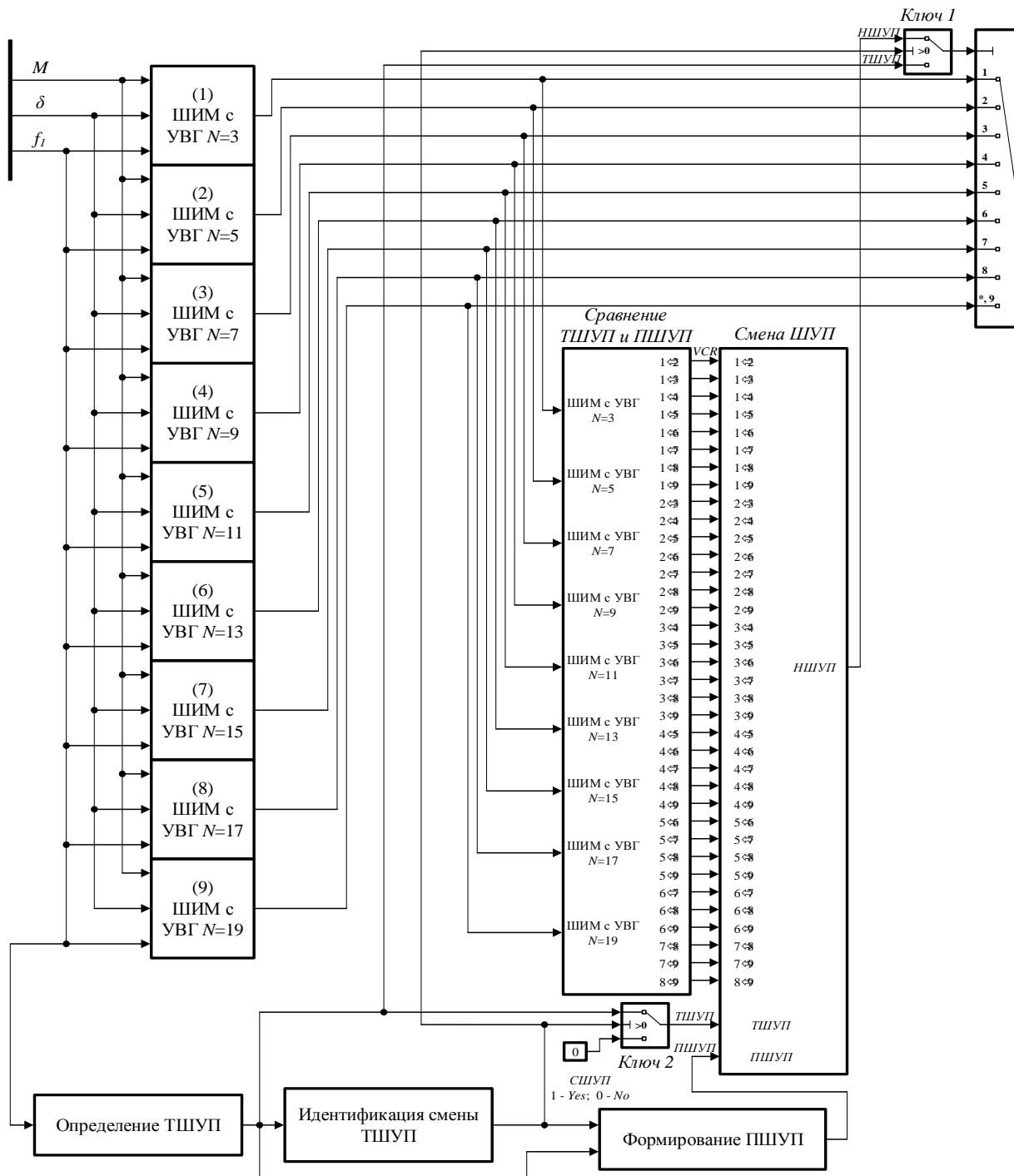


Рис. 3. Структурная схема алгоритма перехода между шаблонами углов переключений

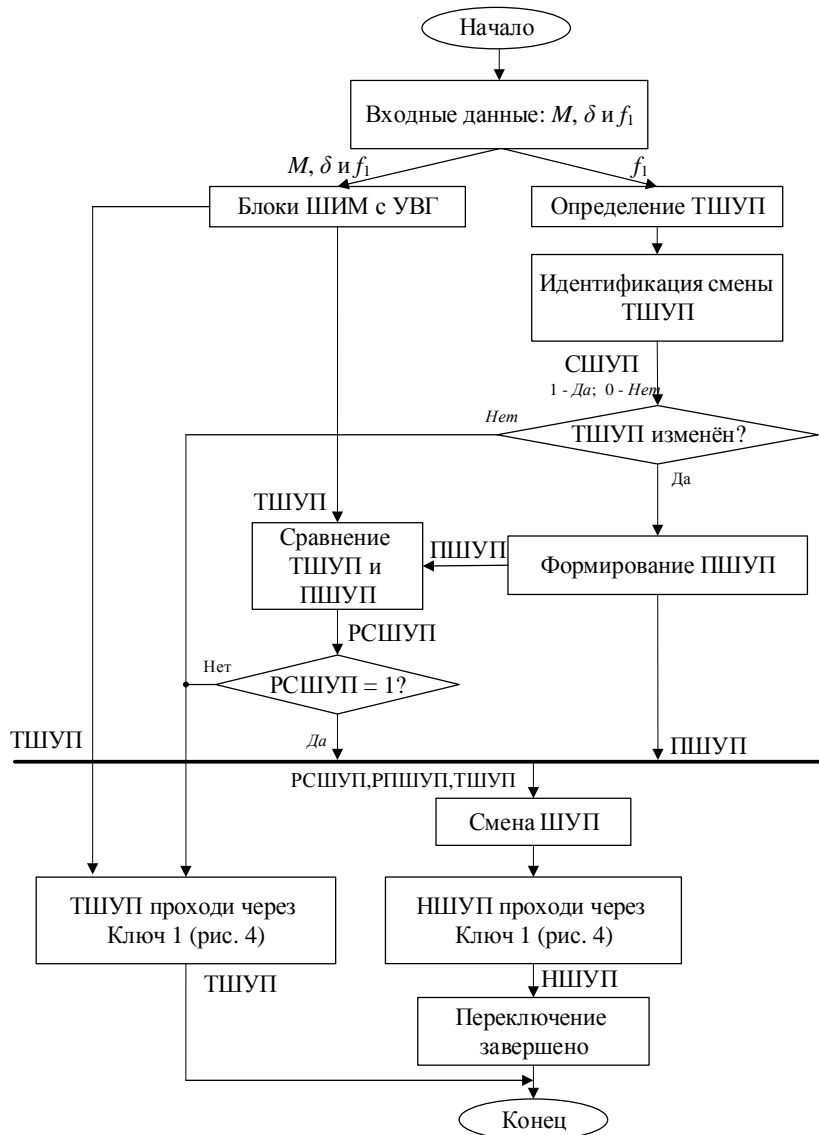


Рис. 4. Блок-диаграмма алгоритма перехода между шаблонами углов переключений

Результаты моделирования

Логико-математическая модель алгоритма была реализована в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink. Параметры, используемые при моделировании, показаны в табл. 2.

Работа описанного в предыдущем разделе алгоритма проиллюстрирована на рис. 5. Область «А» показывает начало перехода, а область «В» – завершение процесса перехода к новой последовательности включения ключей. Как видно из рис. 5, система управления завершает процесс перехода,

когда все условия работы алгоритма выполнены.

Рис. 6 показывает несколько смен ШУП ШИМ с УВГ от $N = 11$ до $N = 19$, где видно, что в сигнале тока отсутствуют броски и колебания во время переключений. На основании проведенных выше экспериментов было показано, что предложенный алгоритм смены шаблонов углов переключений ключей трёхуровневого преобразователя, который был реализован на имитационной модели, может эффективно работать, используя различные схемы переключения ШИМ с УВГ.

Таблица 2

Параметры модели

Параметр	Значение
M	0,8
δ	0
f_1 , Гц	11,84–80
Напряжение DC, В	5020
Время удержания ПШУП, T , с	0,02

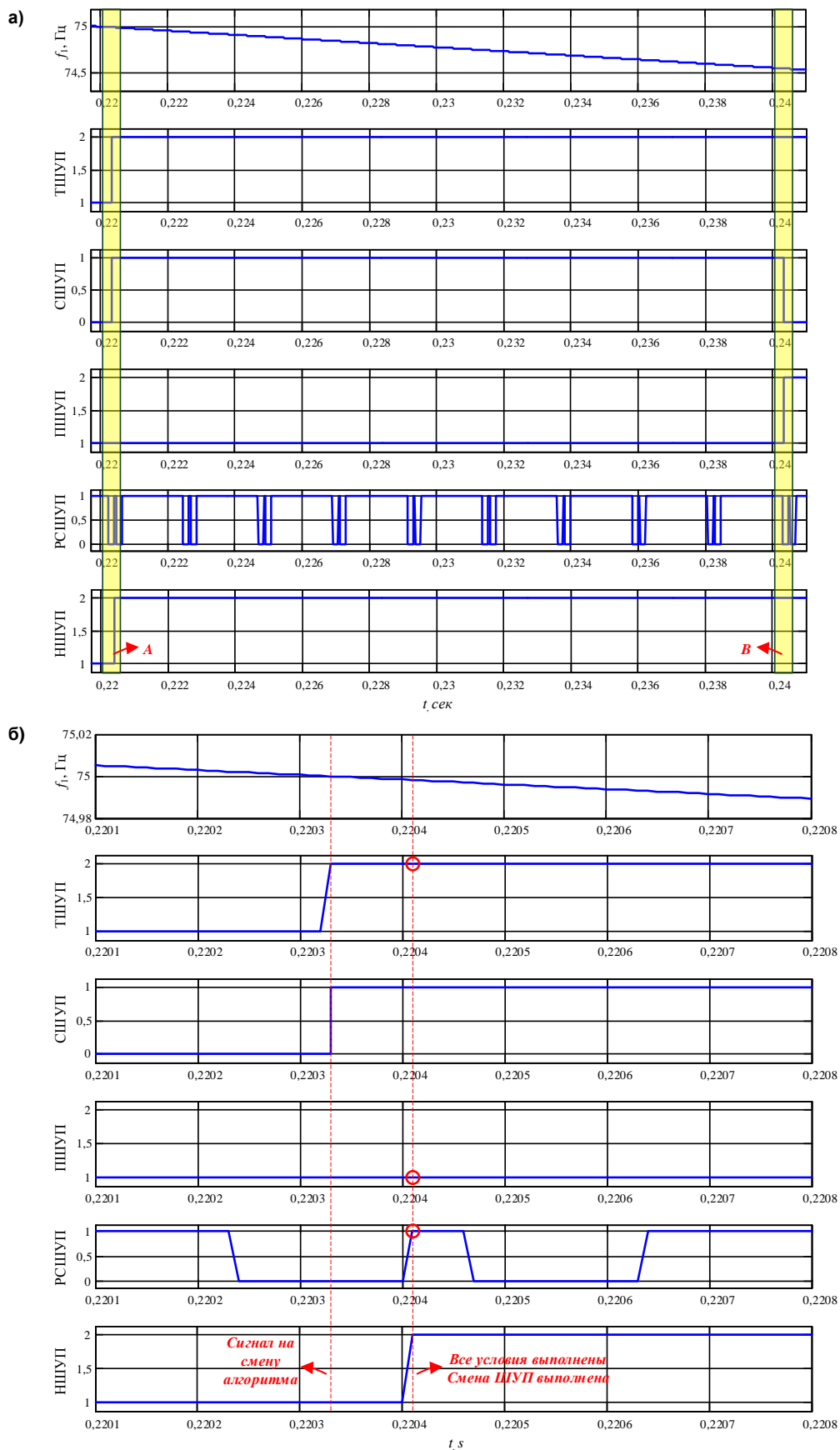


Рис. 5. Диаграмма работы алгоритма, поясняющая принцип его работы: а – переход от одного шаблона переключения ШИМ с УВГ к другому шаблону переключения ШИМ с УВГ; б – временная область «А» начала перехода; в – временная область «В» завершения перехода (см. также с. 106)

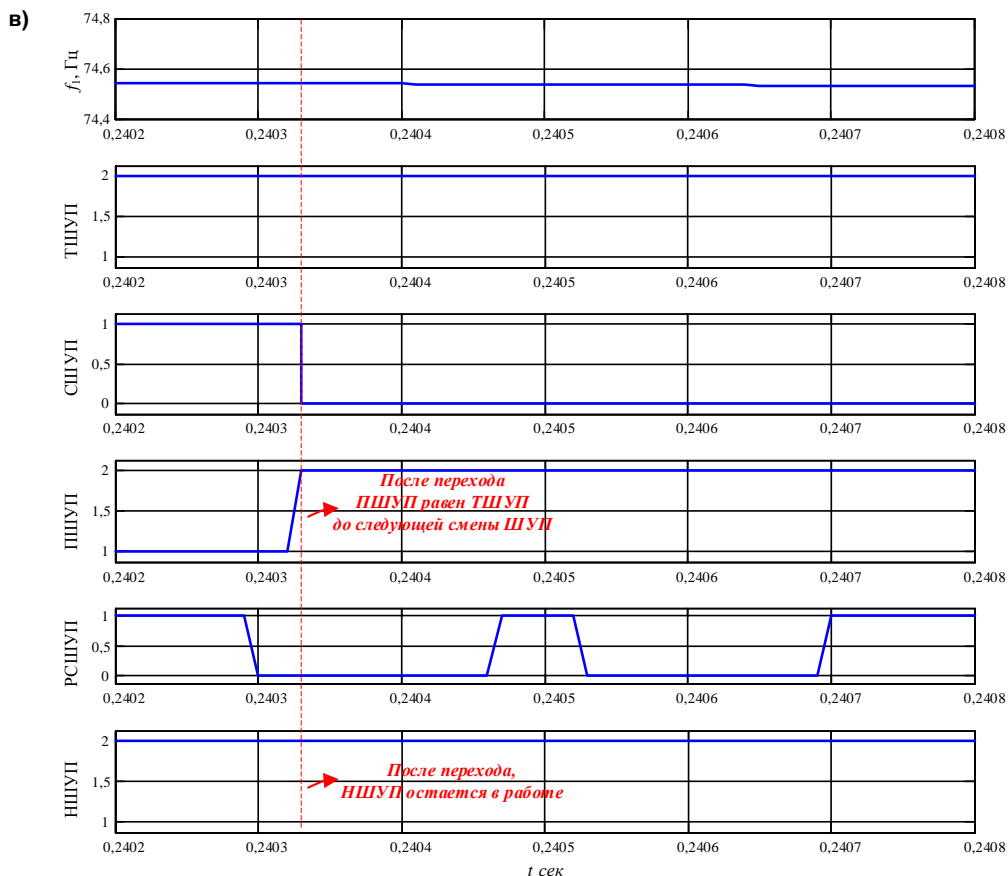


Рис. 5. Окончание

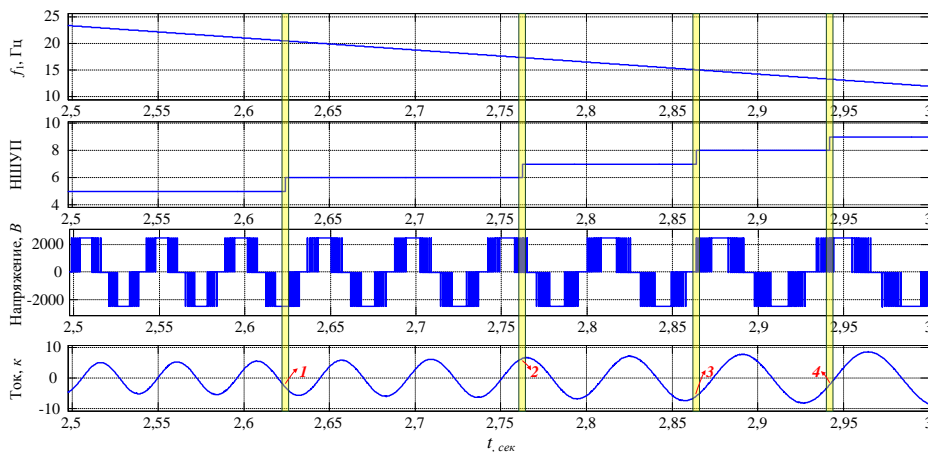


Рис. 6. Результаты моделирования смены ШУП ШИМ с УВГ от $N = 11$ до $N = 19$

Заключение

В работе предложен алгоритм смены шаблонов углов переключений ключей трёхуровневого преобразователя при широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник, который можно осуществить и произвести выбор необходимого шаблона углов переключений в зависимости от изменения частоты выходного напряжения преобразователя. Решена задача перехода между различными шаблонами углов переключений при ШИМ с УВГ, обеспечивающая не более

одного переключения полупроводниковых модулей преобразователя при смене ШУП. Результаты моделирования подтверждают работоспособность алгоритма, демонстрируя формирование переменной частоты выходного напряжения трёхуровневого преобразователя и смены шаблонов углов переключений без бросков и колебаний тока во время переключений. Реализованный алгоритм может быть легко адаптирован под любые другие задачи смены ШИМ.

Литература

1. Радионов, А.А. Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник / А.А. Радионов, А.С. Маклаков, Т. Цзин // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2019. – № 1 (42). – С. 38–44. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-1(42)-38-44
2. Храмин, Т.Р. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 48–52. DOI: 10.24892/rije/20130207
3. Маклаков, А.С. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трёхуровневого преобразователя / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 30–37. DOI: 10.24892/rije/20150105
4. Радионов, А.А. Трёхуровневый активный двунаправленный преобразователь частоты в составе реверсивных электроприводов среднего напряжения: современное состояние и способы управления / А.А. Радионов, А.С. Маклаков // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2015. – № 6 (542). – С. 80–87. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-6-80-87
5. Маклаков, А.С. Энергоэффективное управление двунаправленным преобразователем частоты в составе электропривода ветрогенератора / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 21–26. DOI: 10.24892/rije/20150403
6. Храмин, Т.Р. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКОМа / Т.Р. Храмин, И.Р. Абдулвелеев, Г.П. Корнилов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 38–46.
7. Храмин, Т.Р. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов. / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Вып. 1, № 1. – С. 3–7.
8. Melicio, R. Comparative study of power converter topologies and control strategies for the harmonic performance of variable-speed wind turbine generator systems / R. Melicio, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão // *Energy*. – 2011. – No. 36. – P. 520–529. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.012
9. Храмин, Т.Р. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 4. – С. 7–13. DOI: 10.24892/rije/20140402
10. Храмин, Т.Р. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 3–9.
11. Turnbull, F.G. Selected harmonic reduction in static DC-AC inverters / F.G. Turnbull // *IEEE Trans. Commun. Electron.* – 1964. – Vol. 83, no. 73. – P. 374–378. DOI: 10.1109/tcome.1964.6541241
12. Patel, H.S. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I-Harmonic Elimination / H.S. Patel, R.G. Hoft // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1973. – Vol. IA-9, no. 3. – P. 310–317. DOI: 10.1109/tia.1973.349908
13. Patel, H.S. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part II-Voltage Control Techniques / H.S. Patel, R.G. Hoft // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1974. – Vol. IA-10, no. 5. – P. 666–673. DOI: 10.1109/tia.1974.349239
14. Fei, W.M. A generalized formulation of quarter-wave symmetry SHE-PWM problems for multilevel inverters / W.M. Fei, X.B. Ruan, B. Wu // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2009. – Vol. 24, no. 7. – P. 1758–1766. DOI: 10.1109/tpe.2009.2018094
15. Yang, K. Unified Selective Harmonic Elimination for Multilevel Converters / K. Yang et al. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2017. – Vol. 32, no. 2. – P. 1579–1590. DOI: 10.1109/tpe.2016.2548080
16. Fei, W. Solving the SHEPWM nonlinear equations for three-level voltage inverters based on computed initial values / W. Fei, Y. Zhang, X. Ruan // *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.* – 2007. – P. 1084–1088. DOI: 10.1109/apex.2007.357650
17. Ozpineci, B. Chiasson Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms / B. Ozpineci, L.M. Tolbert, J.N. Chiasson // *IEEE Power Electronics Letters*. – 2005. – Vol. 3, no. 3. – P. 92–95. DOI: 10.1109/lpel.2005.856713
18. Jing, T. Research on Selective Harmonic Elimination Technique based on Particle Swarm Optimization / T. Jing, A.S. Maklakov, O.A. Gasiyarova // *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia*. – 2019. – P. 694–700. DOI: 10.1109/eiconrus.2019.8656834
19. Hybrid PWM Scheme for the Grid Inverter / Y. Zhang, D. Xu, C. Yan, S. Zou // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – 2015. – Vol. 3, no. 4. – P. 1151–1159. DOI: 10.1109/jestpe.2015.2451159

20. *The smooth transition research of different PWM modulations for vector control of induction motor in medium voltage high power* / Y. Wang, X. Wen, X. Guo et al. // *International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing*. – 2011. – P. 1–5. DOI: 10.1109/icems.2011.6073517

Цзин Тао, аспирант кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; jingtao19940214@gmail.com.

Радионов Андрей Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; radionov.mail@gmail.com.

Маклаков Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; alexandr.maklakov.ru@ieee.org.

Поступила в редакцию 27 мая 2020 г.

DOI: 10.14529/power200209

SWITCHING PATTERN TRANSITION ALGORITHM FOR A THREE-LEVEL CONVERTER USING PULSE-WIDTH MODULATION FOR SELECTIVE HARMONIC ELIMINATION

Tao Jing, jingtao19940214@gmail.com,

A.A. Radionov, radionov.mail@gmail.com,

AS. Maklakov, alexandr.maklakov.ru@ieee.org

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper proposes a switching pattern transition algorithm for a three-level converter using pulse-width modulation for selective harmonic elimination. The algorithm enables the user to select the required switching pattern depending on the output voltage frequency of the converter. The paper solves the problem of enabling a transition between switching patterns while limited to a single switching of the semiconductor converter modules. It details the flowchart of the algorithm. The paper further presents the simulation results that prove the algorithm functional and show the generation of variable-frequency voltage by the three-level converter coupled with transition between switching patterns without any current inrush or fluctuations during such transitions. The implemented algorithm can be easily adapted to the transition problems associated with other pulse-width modulation methods.

Keywords: power electronics, pulse-width modulation, selective harmonic elimination, switching pattern, three-level converter.

References

1. Radionov A.A., Maklakov A.S., Jing Tao. [Using of Particle Swarm Optimization for Selective Harmonic Elimination Technique]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1 (42), pp. 38–44. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2019-1(42)-38-44
2. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. [Evaluation of Methods PWM Voltage Active Rectifiers Rolling Mills]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 48–52. (in Russ.) DOI: 10.24892/rijee/20130207
3. Maklakov A.S., Radionov A.A. [Study of SVPWM with Various Vector Selection Tables of Three Level Converter]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30–37. (in Russ.) DOI: 10.24892/rijee/20150105
4. Radionov A.A., Maklakov A.S. [Three Level Back to Back Converters as Part of Medium Voltage AC Drives: Contemporary Condition and Control Methods]. *Russian Electromechanics*, 2015, no. 6, pp. 80–87. (in Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2015-6-80-87
5. Maklakov A.S., Radionov A.A. [Energy-efficient Control of Active Converters in Wind Generator Electric Drive Systems]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 21–26. (in Russ.) DOI: 10.24892/rijee/20150403

6. Khramshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. [Mathematical Model of the Power Circuit of STATCOM of Large Capacity]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no.1, pp. 38–46. (in Russ.)
7. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. [A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no.1, pp. 3–7. (in Russ.)
8. Melício R., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S. Comparative Study of Power Converter Topologies and Control Strategies for the Harmonic Performance of Variable-Speed Wind Turbine Generator Systems. *Energy*, 2011, no. 36, pp. 520–529. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.012
9. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Methods PWM of Large Power Active Rectifier under Unbalanced Voltage Operating Conditions. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2014, vol. 2, no.4, pp. 7–13. (in Russ.) DOI: 10.24892/rjije/20140402
10. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Mathematical Model of the Active Rectifier under Unbalanced Voltage Operating Conditions. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3–9. (in Russ.)
11. Turnbull F.G. Selected harmonic reduction in static DC-AC inverters. *IEEE Trans. Commun. Electron.*, 1964, vol. 83, no. 73, pp. 374–378. DOI: 10.1109/tcome.1964.6541241
12. Patel H.S., Hoft R.G. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I – Harmonic Elimination. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1973, vol. IA-9, no. 3, pp. 310–317. DOI: 10.1109/tia.1973.349908
13. Patel H.S., Hoft R.G. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part II – Voltage Control Techniques. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1974, vol. IA-10, no. 5, pp. 66–673. DOI: 10.1109/tia.1974.349239
14. Fei W.M., Ruan X.B., Wu B. A generalized formulation of quarter-wave symmetry SHE-PWM problems for multilevel inverters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, vol. 24, no. 7, pp. 1758–1766. DOI: 10.1109/tpe.2009.2018094
15. Yang K. et al. Unified Selective Harmonic Elimination for Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 1579–1590. DOI: 10.1109/tpe.2016.2548080
16. Fei W., Zhang Y., Ruan X. Solving the SHEPWM nonlinear equations for three-level voltage inverters based on computed initial values. *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, 2007, pp. 1084–1088. DOI: 10.1109/apex.2007.357650
17. Ozpineci B., Tolbert L.M., Chiasson J.N. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. *IEEE Power Electronics Letters*, 2005, vol. 3, no. 3, pp. 92–95. DOI: 10.1109/lpe.2005.856713
18. Jing T., Maklakov A.S., Gasiyarova O.A. Research on Selective Harmonic Elimination Technique based on Particle Swarm Optimization. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 694–700. DOI: 10.1109/eiconrus.2019.8656834
19. Zhang Y., Xu D., Yan C., Zou S. Hybrid PWM Scheme for the Grid Inverter. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 1151–1159. DOI: 10.1109/jestpe.2015.2451159
20. Wang Y., Wen X., Guo X., Zhao F., Cong W. The smooth transition research of different PWM modulations for vector control of induction motor in medium voltage high power. *International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing*, 2011, pp. 1–5. DOI: 10.1109/icems.2011.6073517

Received 27 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Цзин, Тао. Алгоритм смены шаблонов углов переключений ключей трёхуровневого преобразователя при широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник / Тао Цзин, А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 99–109. DOI: 10.14529/power200209

FOR CITATION

Jing Tao, Radionov A.A., Maklakov AS. Switching Pattern Transition Algorithm for a Three-Level Converter Using Pulse-Width Modulation for Selective Harmonic Elimination. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 99–109. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200209