

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В АЛГОРИТМЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

Оптимальный выбор углов переключений в алгоритме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с удалением выделенных гармоник является сложным вопросом, включающим в себя решение нелинейных уравнений с бесконечным множеством решений. Для расчёта углов переключений в данной статье предложен метод численной оптимизации роя частиц, который был модифицирован путём добавления в алгоритм переменного коэффициента инерции для каждой итерационной процедуры, что позволило повысить надёжность алгоритма, избежать попадания в локальный экстремум и быстрее достичь глобального экстремума в полном пространстве решений. Предложенная реализация позволяет рассчитать несколько наборов углов переключений, что достаточно трудно получить традиционными методами оптимизации функций. В статье показаны результаты расчёта углов переключений для исключения гармоник низкого порядка в автономном режиме с помощью компьютера. Теоретические результаты анализируются и проверяются путем моделирования на примере трехуровневого преобразователя с фиксированной нейтральной средней точкой звена постоянного тока. Результаты моделирования показывают, что вышеупомянутый метод роя частиц эффективно определяет наборы углов переключений для алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник, на основе которых можно добиться наилучшего показателя суммарного гармонического искажения (THD) выходного напряжения преобразователя. Это может быть достигнуто путём использования определённого набора переключений при различных коэффициентах модуляций. Результаты исследования могут быть использованы для разработки алгоритмов ШИМ с УВГ многоуровневых преобразователей.

**Ключевые слова:** преобразовательная техника, ШИМ с удалением выделенных гармоник, метод роя частиц, суммарный коэффициент гармонического искажения.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы многоуровневые преобразователи являются предметом пристального внимания исследователей в области больших мощностей и высоких напряжений. Многоуровневые топологии построения силовых схем полупроводниковых преобразователей обладают преимуществами в отношении энергоэффективности, качеству электроэнергии и уровню электромагнитных помех. Они широко используются для питания двигателей переменного тока с регулируемой скоростью вращения, в статических системах преобразования электрической энергии и гибких системах электроснабжения постоянного и переменного тока [1-6]. Ввиду низкой частоты коммутации высокомоощных вентилях устранение определённых гармоник из выходного напряжения высокомоощного преобразователя является актуальной задачей.

Для управления выходным напряжением преобразователя широко применяются традиционные методы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), такие как синусоидальная ШИМ (СШИМ) и пространственно-векторная ШИМ (ПВШИМ). Однако алгоритмы модуляции на их основе не могут обеспечить устранение необходимых гармоник. Другой известный способ управления ключами преобразователя заключается в подавлении наиболее значимых по уровню гармоник посредством заранее определённых наборов углов переключений. Такой способ в отечественной литературе получил название ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) [7-9]. Алгоритм на основе ШИМ с УВГ может генерировать более качественное напряжение преобразователя по сравнению с СШИМ и

ПВШИМ при одинаковой частоте коммутации полупроводниковых модулей. Основная трудность в реализации ШИМ с УВГ заключается в нахождении решения системы нелинейных уравнений, полученных из самой задачи приведения к нулю выделенных гармоник из периодического выходного напряжения преобразователя.

Анализ научной литературы показал, что для нахождения углов переключения ШИМ с УВГ часто используют итерационные численные методы. У них необходимо заранее определить начальные приближения, которые должны быть близки к правильному решению системы уравнений. Такие методы правильно и быстро находят решения при условии правильно выбранного начального приближения, но позволяют получить только один набор решений. В настоящее время становятся популярными методы на основе стохастического поиска, такие как генетический алгоритм (ГА) [14-16] и оптимизационный метод роя частиц (МРЧ) [17-19]. Вышеупомянутые неудобства, существующие в классических итерационных методах, удовлетворительно преодолеваются с помощью ГА и МРЧ.

В данной статье для удаления выделенных гармоник был использован модифицированный МРЧ, основанный на добавлении переменного коэффициента инерции для каждой итерационной процедуры. Статья организована следующим образом: обозначена формулировка проблемы; показан принцип и этапы выполнения предложенного алгоритма МРЧ; приведены результаты моделирования зависимостей углов переключений, коэффициента модуляции и суммарно гармонического искажения (THD) выходного напряжения; представлены основные выводы по работе.

## ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ ДЛЯ ШИМ С УВГ

На рис. 1, а показана схема трехуровневого преобразователя с фиксированной нейтральной средней точкой звена постоянного тока (трёхуровневый преобразователь). Схема включает по четыре полупроводниковых модуля  $S_{a1-4}$ ,  $S_{b1-4}$  и  $S_{c1-4}$  с обратными диодами в каждом фазном плече моста, два эквивалентных конденсатора  $C_1$  и  $C_2$ , образующих постоянное напряжение  $U_{dc}$ . Для данного устройства применяется метод ШИМ с УВГ, при котором расчёт углов переключения  $\alpha_N$  необходим для генерации сигналов управления включением/выключением модулей с целью формирования кривой выходного фазного напряжения, как показано на рис. 1, б, где  $U_{A0}$  – напряжение фазы А,  $\omega$  – угловая частота,  $t$  – время.

В методе ШИМ с УВГ для определения всех гармоник выходного фазного напряжения преобразователя используется анализ Фурье. С помощью преобразования Фурье периодическая функция напряжения получается в виде

$$V_{A0}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)]. \quad (1)$$

Принимая во внимание четвертьволновую симметрию напряжения каждой фазы, чётные гармоники будут отсутствовать (т.е.  $B_n = 0$ ), а составляющие  $n$ -й нечётной гармоники определяются углами переключения первой четверти периода как

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

при условии, что

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N < \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

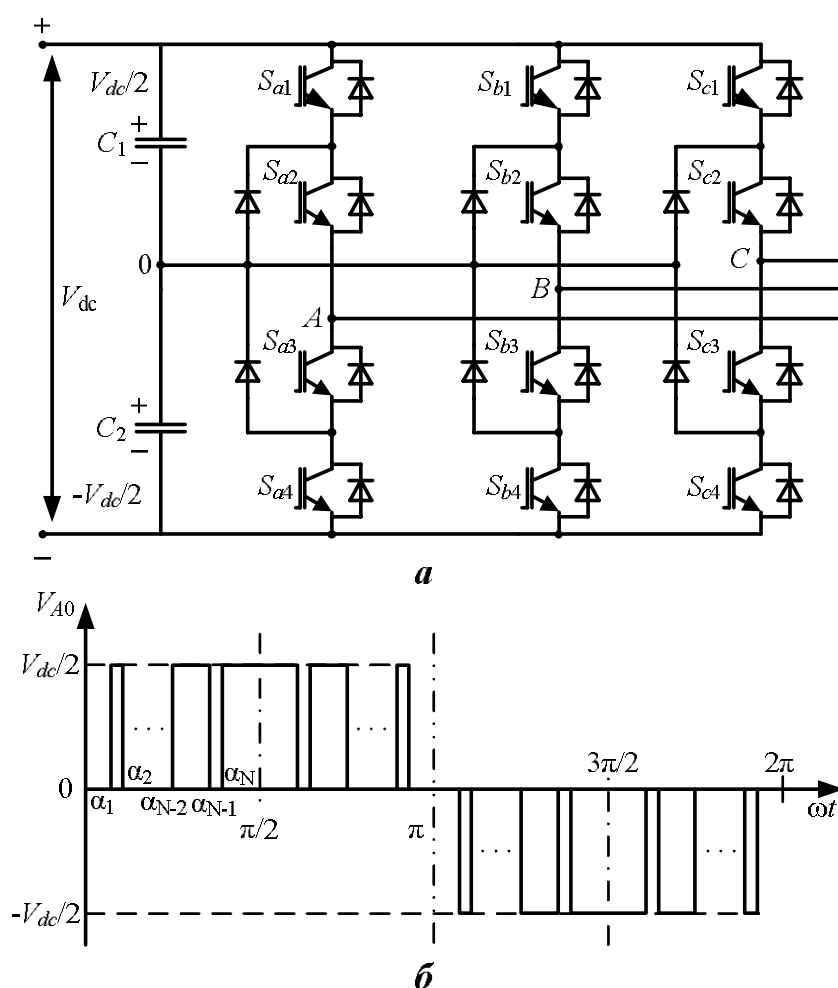


Рис. 1. Трёхуровневый преобразователь:  
а – схема преобразователя; б – типовая форма

 выходного напряжения ( $N$  – нечетная)

В системе (2)  $A_1$  определяет основную гармонику напряжения преобразователя, а  $A_n$ , где  $n \neq 1$ , определяет высшие гармоники, которые необходимо исключить. Для поддержания постоянного уровня основной гармоники и одновременного устранения выбранного количества высших гармоник система (2) решается как

$$\begin{cases} A_1(\alpha) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(\alpha_k) = M; \\ A_5(\alpha) = \frac{4}{5\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(5\alpha_k) = 0; \\ A_7(\alpha) = \frac{4}{7\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(7\alpha_k) = 0; \\ \vdots \\ A_n(\alpha) = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $M$  – коэффициент модуляции, который вычисляется по формуле  $M = A_1 / (V_{dc}/2)$ .

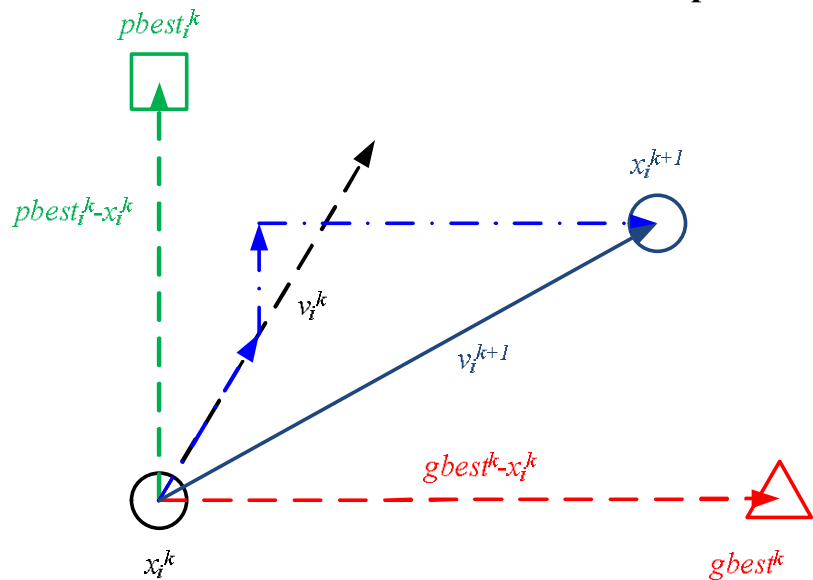
Таким образом, система нелинейных уравнений формируется на основе заданного уровня основной гармоники и подлежащих удалению выделенных гармоник. Третья гармоника не учитывается в системе (4), так как рассматривается симметричная трёхфазная система напряжений. Очевидно, что  $N-1$  гармоник можно устранить с помощью  $N$  количества углов переключений за четверть периода выходного напряжения преобразователя. Система уравнений (4) имеет множество решений в пределах заданных условий, а также имеет особенность разрыва при некоторых значениях углов переключений  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]$ , при которых не существует правильного решения [13], [20].

## ПРИНЦИП МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

Метод роя частиц впервые был предложен Кеннеди и Эберхартом в 1995 году как популяционный алгоритм эвристического и стохастического поиска [18]. Простота исполнения и способность быстро сходиться к достаточно хорошему решению делают его привлекательным для многих учёных при решении широкого спектра задач оптимизации.

В системе МРЧ рой частиц движется в  $D$ -мерном пространстве – области поиска. Первоначально частицы расположены во всей области поиска и имеют собственный случайный вектор скорости. Затем каждая частица начинает двигаться в определенном направлении до некоторой точки, в которой рассчитывается значение целевой функции. Все частицы запоминают своё лучшее значение целевой функции и получают информацию о результатах поиска других частиц во всей области поиска. После каждого обновления своего местоположения частицы корректируют вектор скорости таким образом, чтобы быть ближе к своей наилучшей позиции  $pbest$ , а также приблизиться к лучшей глобальной позиции  $gbest$ , достигнутой всеми частицами в рое на их пути. Графическая интерпрета-

ция обновления скорости и положения в механизме поиска МРЧ для одной частицы показана на **рис. 2**.



**Рис. 2.** Упрощенная концепция механизма поиска МРЧ

Вектор скорости  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$  каждой частицы в пространстве обновляется с помощью выражения (5), а затем посредством выражения (6) обновляется вектор положения частицы  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$  на текущей итерации [18-19]. Движение всех частиц в пространстве решений приводит к общему решению, которое принимается для расчёта оптимального значения целевой функции.

$$v_i^{k+1} = \omega^k v_i^k + c_1 r_1 (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (gbest^k - x_i^k), \quad (5)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}, \quad (6)$$

где  $k$  – номер итерации;  $\omega$  – инерционный вес;  $c_1$  и  $c_2$  – весовые коэффициенты;  $r_1$  и  $r_2$  – случайные числа  $[0, 1]$ .

Первая составляющая выражения (5) называется «коэффициент инерции» и является важным параметром для сходимости алгоритма МРЧ, так как с помощью этого параметра можно регулировать влияние предыдущей скорости на текущую скорость. Вторая составляющая называется «когнитивный компонент» и является результатом поиска каждой частицы. Третья составляющая называется «социальный компонент» и является результатом общего поиска всех частиц. Новые значения  $pbest$  и  $gbest$  обновляются с помощью выражения (5). Оптимальным решением системы будет равенство « $pbest = gbest$ ».

Коэффициент инерции  $\omega$  играет важную роль в балансе между локальными и глобальными решениями в поиске. Большее значение коэффициента  $\omega$  способствует глобальному поиску, а меньшее – локальному. Таким образом, чтобы избежать преждевременной сходимости, было рассмотрено переменное значение  $\omega$ , где наибольшее значение используется в начальных итерациях и постепенно уменьшается в последующих итерациях согласно выражению

$$\omega^k = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} k, \quad (7)$$

где  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\max}$  – минимальный и максимальный весовые коэффициенты инерции,  $iter_{\max}$  – максимальное количество итераций.

МРЧ для ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ  
в ШИМ с УВГ

Для того чтобы найти оптимальные углы переключе-

ния в системе нелинейных уравнений (4) с помощью МРЧ, необходимо выполнить следующие шаги:

**Шаг 1.** Определение параметров размера популяции (количество частиц)  $N$ , размерность пространства частиц  $D$ , максимальное количество итераций  $iter_{\max}$ . Необходимо определить нижнюю и верхнюю границы скорости и положения частицы. Для рассматриваемой ШИМ с УВГ с учетом четвертьволновой симметрии выходного напряжения преобразователя вектор положения каждой частицы случайным образом инициализируется от 0 до  $\pi/2$ . Вектор скорости каждой частицы определяется случайным образом от  $v_{\min}$  до  $v_{\max}$ . Размерность пространства частиц  $D$  будет соответствовать количеству углов переключений от  $\alpha_1$  до  $\alpha_D$ .

**Шаг 2.** Оценка ожидаемого значения целевой функции для каждой частицы будет выполняться в  $D$  переменных. Устранение выделенных гармоник является целью метода ШИМ с УВГ, следовательно, целевая функция должна быть сведена к минимуму, и она связана с требуемым значением основной гармоники напряжения преобразователя и подлежащих удалению гармониками. В качестве задачи оптимизации, включающей приведенное выше описание, применима целевая функция  $f(\alpha)$  в виде

$$\min \{ f(\alpha) = |M - A_1(\alpha)| + |A_5(\alpha)| + \dots \quad (8)$$

$$\dots + |A_{3D-2}(\alpha)| \},$$

при условии:  $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_D < \frac{\pi}{2}$ .

**Шаг 3.** Регулировка  $pbest$  и  $gbest$ . Если текущая позиция одной частицы лучше её предыдущей позиции  $pbest$ , то предыдущее значение  $pbest$  должно быть заменено текущей позицией. Точно так же предыдущее значение  $gbest$  должно быть заменено текущим лучшим положением  $pbest$ . Таким образом, значения  $pbest$  и  $gbest$  можно изменять на каждой итерации.

**Шаг 4.** На каждой итерации частицы движутся по пространству поиска со своей собственной скоростью и положением. Скорость и положение каждой частицы изменяются на основе выражений (5) и (6).

**Шаг 5.** Обработка граничных условий. Если скорость или положение частицы превышает нижнюю или верхнюю границу, то она должна быть случайным образом вновь определена между нижней и верхней границами.

**Шаг 6.** Достигнутое достаточно хорошее значение целевой функции или превышение максимального количества итераций определяется как критерий остановки алгоритма.

МРЧ находит все возможные наборы решений и в итоге получается несколько наборов углов переключений для устранения выделенных гармоник. В **табл. 1** приведены используемые при реализации метода МРЧ параметры.

**Таблица 1**

**Параметры предложенного МРЧ**

Параметр	Величина
Размер популяции $N$	100
Размерность пространства поиска $D$	3 или 5
Максимальное количество итераций $iter_{\max}$	300
Весовой коэффициент $c_1$	1,49445
Весовой коэффициент $c_2$	1,49445
Максимальный вес инерции $\omega_{\max}$	0,7
Минимальный вес инерции $\omega_{\min}$	0,2
Верхняя граница пространства $x_{\max}$	$\pi/2$
Нижняя граница пространства $x_{\min}$	0



Максимальная скорость $v_{\max}$	$0,2 \cdot (x_{\max} - x_{\min})$
Минимальная скорость $v_{\min}$	$-v_{\max}$

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложенный МРЧ для ШИМ с УВГ реализован в программе Matlab с помощью m-файла. В написанном коде программы углы переключения вычисляются для каждого значения коэффициента модуляции  $M$  от 0,7 до 1 с шагом 0,01. Результаты расчёта углов переключения загружены в табличном виде в реализованную в программе Matlab/Simulink модель трехуровневого преобразователя с фиксированной нейтральной средней точкой звена постоянного тока для генерации сигналов управления ключами.

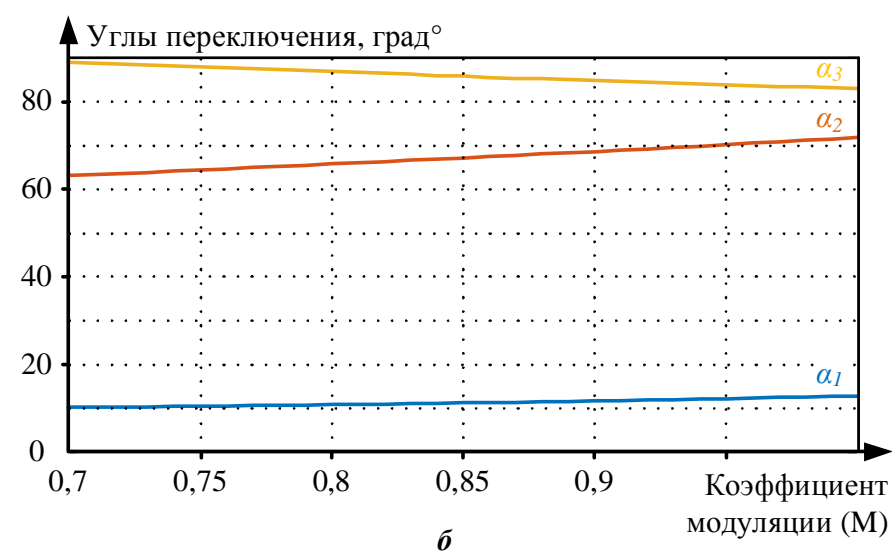
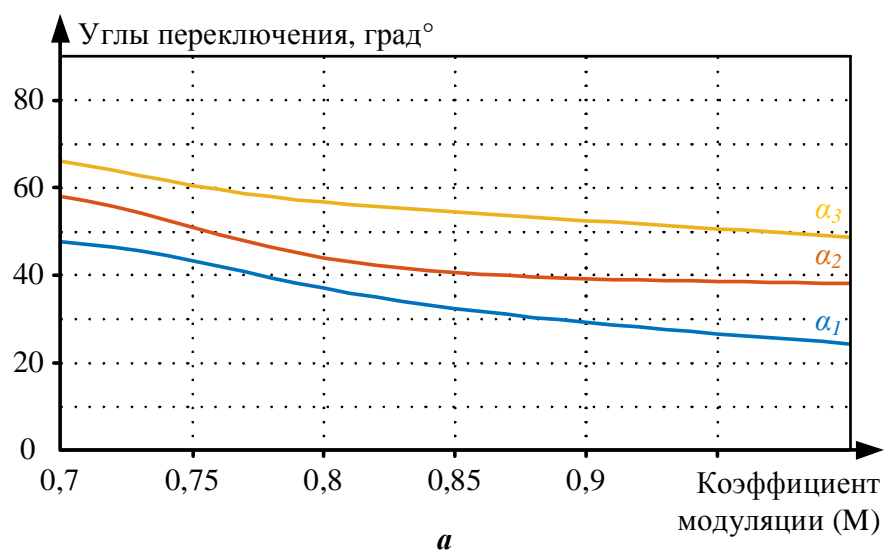
**Удаление 5-й и 7-й гармоник из выходного напряжения преобразователя**

В соответствии с выражением (4) функция устранения 5-й и 7-й гармоник должна быть решена при неизвестных  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , следовательно, целевая функция в этом случае определена как

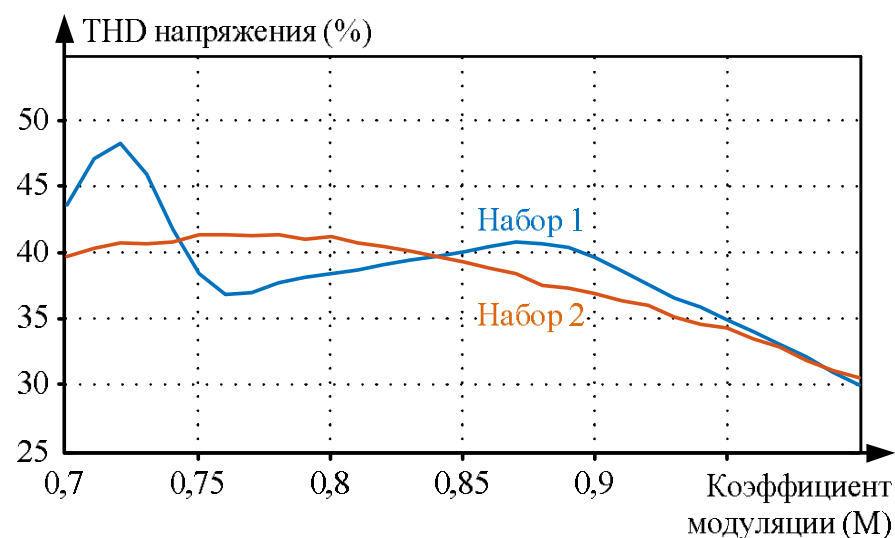
$$\min \{ f(\alpha) = |M - A_1(\alpha)| + |A_5(\alpha)| + |A_7(\alpha)| \}. \quad (9)$$

Результаты моделирования показаны на **рис. 3, а, б**, где видно, что траектории углов переключения для устранения 5-й и 7-й гармоник могут быть разными, а также значения THD (**рис. 4**) для каждого коэффициента модуляции  $M$  неодинаково.

Для более наглядного сравнения полученных результатов в **табл. 2** приведены углы переключения, коэффициенты гармоник и THD выходного напряжения при коэффициентах модуляции 0,7 и 0,9 для двух рассматриваемых наборов переключений.



**Рис. 3.** Углы переключения для устранения 5-й и 7-й гармоник ( $N = 3$ ): а – набор 1; б – набор 2



**Рис. 4.** Сравнение THD для двух наборов углов переключений ( $N = 3$ )

**Таблица 2**

**Сравнение результатов расчёта**

$M$		0,7		0,9	
		Набор 1	Набор 2	Набор 1	Набор 2
Угол переключения (УП), град	$\alpha_1$	47,74	10,46	29,22	11,95
	$\alpha_2$	58,08	63,04	39,24	68,58
	$\alpha_3$	66,04	88,87	52,50	84,62
Уровень гармоник (УГ), %	h1	100	100	100	100
	h5	0,27	0,03	0,01	0,08
	h7	0,02	0,08	0,13	0,09
THD, %		43,58	39,71	39,61	36,88

Международным стандартом IEEE-519 рекомендовано, чтобы уровень каждой отдельной гармоники был не более 3% от основной составляющей. Из **табл. 2** видно, что 5-я и 7-я гармоники эффективно устраняются посредством двух различных наборов углов переключений. Однако суммарный уровень гармонического искажения при одинаковых значениях коэффициента модуляции различный. Следовательно, для снижения THD напряжения несколько наборов переключений могут быть более эффективно использованы на всём диапазоне изменения коэффициента модуляции.

**Удаление 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник из выходного напряжения преобразователя**

Функция устранения 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник должна быть решена при неизвестных  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ , и целевая функция в этом случае определяется как

$$\min \left\{ f(\alpha) = |M - A_1(\alpha)| + |A_5(\alpha)| + |A_7(\alpha)| + |A_{11}(\alpha)| + |A_{13}(\alpha)| \right\}. \quad (10)$$

Полученные траектории различных углов переключения представлены на **рис. 5**. На **рис. 6** показана взаимосвязь между каждым значением THD выходного напряжения и соответствующим коэффициентом модуляции.

В **табл. 3** приведены углы переключения, коэффициенты гармоник и THD напряжения при коэффициентах модуляции 0,7 и 0,9 для трёх рассматриваемых наборов переключений. Из **табл. 3** видно, что использование предложенного подхода реализации МРЧ в алгоритме ШИМ с УВГ позволяет устранить нежелательные гармоники, в то же время сохраняя заданный уровень основной гармоники.

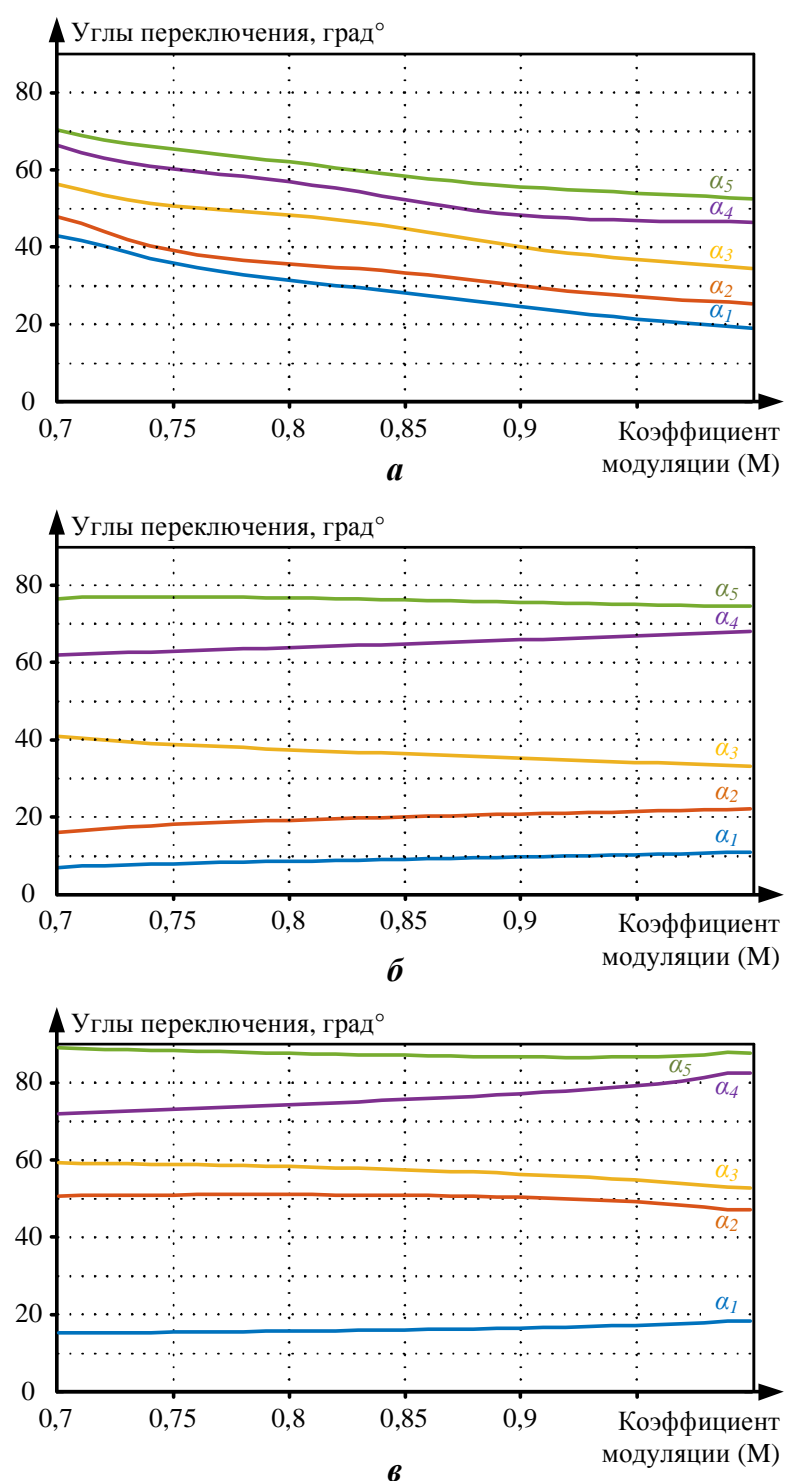


Рис. 5. Углы переключения для устранения 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник ( $N = 5$ ): а – набор 1; б – набор 2; в – набор 3

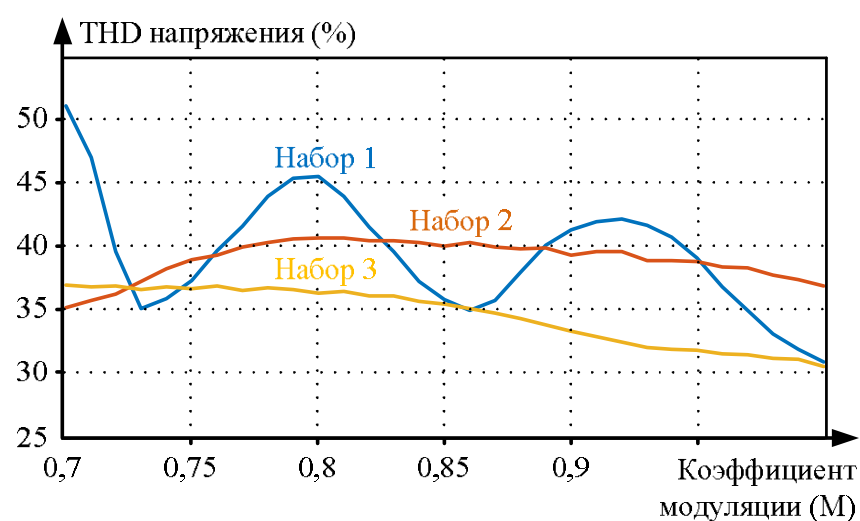


Рис. 6. Сравнение THD для трёх наборов углов переключений ( $N = 5$ )

Таблица 3

Сравнение результатов расчёта

M		0,7			0,9		
		Набор 1	Набор 2	Набор 3	Набор 1	Набор 2	Набор 3
УП, град.	$\alpha_1$	42,91	6,67	15,39	24,65	9,39	16,73
	$\alpha_2$	47,78	15,68	51,04	29,97	20,53	50,61
	$\alpha_3$	56,25	40,70	59,53	40,05	35,07	56,69
	$\alpha_4$	66,29	61,93	72,32	48,27	65,77	77,52
	$\alpha_5$	70,36	76,58	89,37	55,63	75,59	87,09
УГ, %	h1	100	100	100	100	100	100
	h5	0,05	0,1	0,28	0,01	0,11	0,06
	h7	0,2	0,03	0,17	0,09	0,15	0,05
	h11	0,06	0,04	0,21	0,12	0,05	0,18
	h13	0,11	0,07	0,1	0,33	0,02	0,1
THD, %		51,05	35,12	36,88	41,26	39,27	33,22

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник позволяет получить несколько наборов углов переключений и обеспечить при этом эффективное подавление выбранных гармоник. Кроме того, использование различных наборов переключений позволит минимизировать суммарный индекс гармонического искажения на всём диапазоне изменения коэффициента модуляции преобразователя. Это может быть достигнуто путём использования определённого набора переключений при различных коэффициентах модуляций. Результаты исследования могут быть использованы для разработки алгоритмов ШИМ с УВГ многоуровневых преобразователей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multi-level inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, (2002).
2. Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters-a new breed of power converters. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 3, pp. 509-517, (1996).
3. B. Wu, High-Power Converters and AC Drives. New York: Wiley-IEEE Press, (2006).
4. S. Kouro et al., Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2553-2580, (2010).
5. L.M. Tolbert, Fang Zheng Peng and T. G. Habetler. Multi-level inverters for large electric drives. IEEE Transactions on Industry Applications. vol. 35, no. 1, pp. 36-44, (1999).
6. J.M. Carrasco et al. Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, (2006).
7. D.G. Holmes and T. A. Lipo. Pulse Width Modulation for Power Converters. Piscataway, NJ: IEEE Press, (2003).
8. N.S. Hasan et al. Reviews on Multilevel inverter and Modulation Techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 163-174, (2017).
9. Z. Du, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic elimination for multilevel inverter with programmed PWM method. in 39th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, vol.4, pp. 2210-2215, (2004).
10. H.S. Patel and R. G. Hoft. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I-Harmonic Elimination, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-9, no. 3, pp. 310-317, (1973).
11. Chunhui Wu, Qirong Jiang and Chunpeng Zhang. An optimization method for three-level selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM). in International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 1346-1350, (2005).
12. J. N. Chiasson, L. M. Tolbert, K. J. McKenzie and Zhong Du. Elimination of harmonics in a multilevel inverter using the theory of symmetric polynomials and resultants. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 2, pp. 216-223, (2005).
13. J. N. Chiasson, L. M. Tolbert, K. J. McKenzie and Zhong Du. Control of a multilevel inverter using resultant theory. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 11, no. 3, pp. 345-354, (2003).
14. B. Ozpineci, L.M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, (2005).

15. A.I. Maswood and S. Wei. Genetic-algorithm-based solution in PWM converter switching. IEE Proceedings – Electric Power Applications, vol. 152, no. 3, pp. 473–478, (2005).
16. B. Ozpineci, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, (2005).
17. H. Taghizadeh and M. Tarafdar Hagh. Harmonic elimination of multilevel inverters using particle swarm optimization. in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, U.K., pp. 393-396, (2008).
18. J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. Proceedings of International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, (1995).
19. M. Clerc and J. Kennedy. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, (2002).
20. J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie and Zhong Du. A complete solution to the harmonic elimination problem. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 2, pp. 491-499, (2004).

Поступила в редакцию 11 января 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### USING OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR SELECTIVE HARMONIC ELIMINATION TECHNIQUE

Andrey A. Radionov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: radionov.mail@gmail.com.

Alexandr S. Maklakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: maklakov.work@gmail.com.

Jing Tao

Postgraduate Student, Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Solving of nonlinear transcendental equations with multiple solutions is a complex task of selective harmonic elimination pulse-width modulation (SHEPWM) technique for multilevel converters. SHEPWM technique making use of particle swarm optimization (PSO) is considered in this paper. PSO includes varied inertia weight in each iterative procedure in order to decrease falling into the local optimum and improve the algorithm robustness to achieve the global optimum of the solution space. The developed implementation makes it possible to calculate several combinations of switching angles, which is rather difficult to obtain by traditional methods of optimization. The article shows the results of offline calculation of the switching angles to exclude low order harmonics. Research results are simulated and tested by modeling for a three-level neutral point clamped converter. Simulation results show that the above mentioned approach effectively eliminates the specified lower order harmonics, whereas the switching angle trajectory and total harmonic distortion (THD) of output voltage are different. The research results can be used to design SHEPWM algorithms for three-level converters.

**Keywords:** power electronics, selective harmonic elimination, particle swarm optimization, total harmonic distortion.

#### REFERENCES

1. J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, (2002).
2. Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters-a new breed of power converters. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 3, pp. 509-517, (1996).
3. B. Wu, High-Power Converters and AC Drives. New York: Wiley-IEEE Press, (2006).
4. S. Kouro et al., "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2553-2580, (2010).
5. L.M. Tolbert, Fang Zheng Peng and T.G. Habetler. Multilevel inverters for large electric drives. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 1, pp. 36-44, (1999).
6. J.M. Carrasco et al. Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, (2006).
7. D.G. Holmes and T.A. Lipo. Pulse Width Modulation for Power Converters. Piscataway, NJ: IEEE Press, (2003).
8. N.S. Hasan et al. Reviews on Multilevel inverter and Modulation Techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 163-174, (2017).
9. Z. Du, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic elimination for multilevel inverter with programmed PWM method. in 39th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, vol.4, pp. 2210-2215, (2004).
10. H.S. Patel and R.G. Hoft. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I-Harmonic Elimination, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-9, no. 3, pp. 310-317, (1973).
11. Chunhui Wu, Qirong Jiang and Chunpeng Zhang. An optimization method for three-level selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM). in International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 1346–1350, (2005).
12. J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie and Zhong Du. Elimination of harmonics in a multilevel inverter using the theory of symmetric polynomials and resultants. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 2, pp. 216-223, (2005).
13. J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie and Zhong Du. Control of a multilevel inverter using resultant theory. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 11, no. 3, pp. 345-354, (2003).
14. B. Ozpineci, L.M. Tolbert and J.N. Chiasson. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, (2005).
15. A.I. Maswood and S. Wei. Genetic-algorithm-based solution in PWM converter switching. IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 152, no. 3, pp. 473–478, (2005).

16. B. Ozpineci, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic optimization of multilevel inverters using genetic algorithms. *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, (2005).
  17. H. Taghizadeh and M. Tarafdar Hagh. Harmonic elimination of multilevel inverters using particle swarm optimization. in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, U.K., pp. 393-396, (2008).
  18. J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. *Proceedings of International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942-1948, (1995).
  19. M. Clerc and J. Kennedy. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, (2002).
  20. J.N. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. McKenzie and Zhong Du. A complete solution to the harmonic elimination problem. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 491-499, (2004).
- 

Радионо́в А.А., Маклаков А.С., Цзин Тао. Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 38-44. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-38-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-38-44)

Radionov A.A., Maklakov A.S., Jing Tao. Using of Particle Swarm Optimization for Selective Harmonic Elimination Technique. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 38-44. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-38-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-38-44)

---