

Абулвелеев И.Р.<sup>1</sup>, Храмшин Т.Р.<sup>1</sup>, Корнилов Г.П.<sup>1</sup>, Абдулвелеева Р.Р.<sup>2</sup>, Косматов В.И.<sup>1</sup><sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>2</sup> Новотроицкий филиал национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

## ФОРМИРОВАНИЕ ШАБЛОНОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ТРЕХУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА С ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В статье рассмотрены способы формирования шаблонов переключений трехуровневого инвертора с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Шаблоны представляют собой комбинацию переключений трех ближайших векторов из их совокупности, представленной в форме известного шестиугольника пространственных векторов. Формирование задающего вектора с участием трех базовых векторов известно в литературе под названием NTV (Nearest Three Vectors). В зависимости от величины коэффициента модуляции, принимающего значения от 0 до 1, выделяют три различных диапазона. Предметом исследования данной статьи является оптимизация шаблонов переключений во всех диапазонах с целью уменьшения числа коммутаций ключей инверторов электроприводов большой мощности. Дан анализ гармонического состава выходного напряжения инвертора при различных величинах коэффициента модуляции и оптимизированном алгоритме переключений. Отмечено, что оптимизированные алгоритмы векторной ШИМ с пониженным числом переключений позволяют уменьшить коммутационные потери и сохранить приемлемый гармонический состав выходного напряжения инвертора. Результаты исследования получены на основе имитационного моделирования в среде Matlab Simulink.

**Ключевые слова:** трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой, векторная широтно-импульсная модуляция, шаблоны переключений, коэффициент модуляции.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных электроприводах большой мощности широко используются двухзвенные преобразователи частоты на базе трехуровневых инверторов напряжения с фиксированной нейтральной точкой NPC-VSI (Neutral Point Clamped Voltage Source Inverter) [1, 2].

Для формирования выходного напряжения трехуровневого инвертора (рис. 1) наиболее часто используют метод пространственно-векторной ШИМ, или SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation), обладающий значительной гибкостью [3].

В работах [4-7] данный метод ШИМ описан применительно к электроприводам малой и средней мощности, для которых частота модуляции составляет единицы килогерц. В приводах большой мощности указанная частота значительно ниже и составляет порядка 250-450 Гц. Несмотря на это, актуальной проблемой является снижение коммутационных потерь в силовых ключах за счет дальнейшего уменьшения числа переключений при сохранении частоты модуляции. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование синхронного метода модуляции, для которого частота ШИМ кратна частоте основной гармоники выходного напряжения инвертора. Преимуществом такого метода является предопределенность положений задающего вектора и, как следствие, возможность оптимизации траектории переключений между этими положениями [8, 9].

Плоскость базовых векторов для трехуровневого инвертора содержит 19 векторов, которые подразделяются на четыре группы: 6 длинных ( $L$ ), 6 средних ( $M$ ), 6 коротких ( $S$ ) и один нулевой ( $O$ ) [10, 11].

Согласно методу пространственно-векторной ШИМ, из множества базовых векторов выбираются три вектора, наиболее близко расположенных к зада-

ющему  $U_{ref}$  (рис. 2). Такой подход получил название NTV (Nearest Three Vectors). Расчет продолжительности включения каждого из них осуществляется по определенному алгоритму [3, 5]. Обработка положений задающего вектора в фиксированные моменты времени осуществляется в *элементарных циклах* путем последовательного применения трех выбранных базовых векторов с учетом рассчитанных продолжительностей включения. В зависимости от принадлежности задающего вектора одной из четырех областей  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$  или  $A4$  элементарный цикл реализуется одним из классических *шаблонов переключений* [3]:

$$A1 = (op - ap - bp - oo - bn - an - on) - \\ - (on - an - bn - oo - bp - ap - op);$$

$$A2 = (ap - c - a - an) - \\ - (an - a - c - ap);$$

$$A3 = (bp - ap - c - bn - an) - \\ - (an - bn - c - ap - bp);$$

$$A4 = (bp - b - c - bn) - \\ - (bn - c - b - bp).$$

Рассмотренные выше области  $A1$ - $A4$  принадлежат первому сектору  $A$  шестигранника базовых векторов. Всего подобных секторов шесть, наборы базовых векторов в них одинаковые, отличие состоит только в комбинации состояния силовых ключей при реализации этих векторов. В связи с этим формирование шаблонов переключений достаточно рассмотреть на примере сектора  $A$ .

Оптимизация шаблонов переключений с целью уменьшения числа коммутаций ключей инверторов большой мощности является предметом исследования данной статьи.

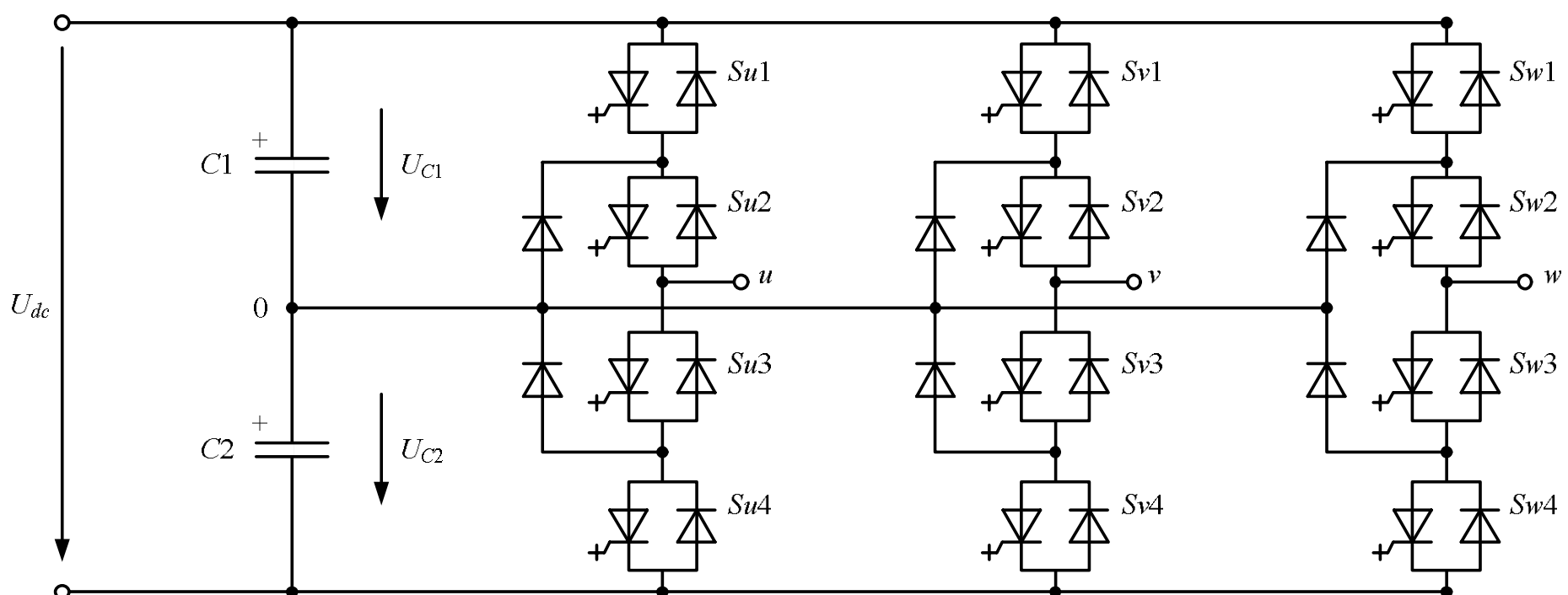


Рис. 1. Трехуровневый инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой

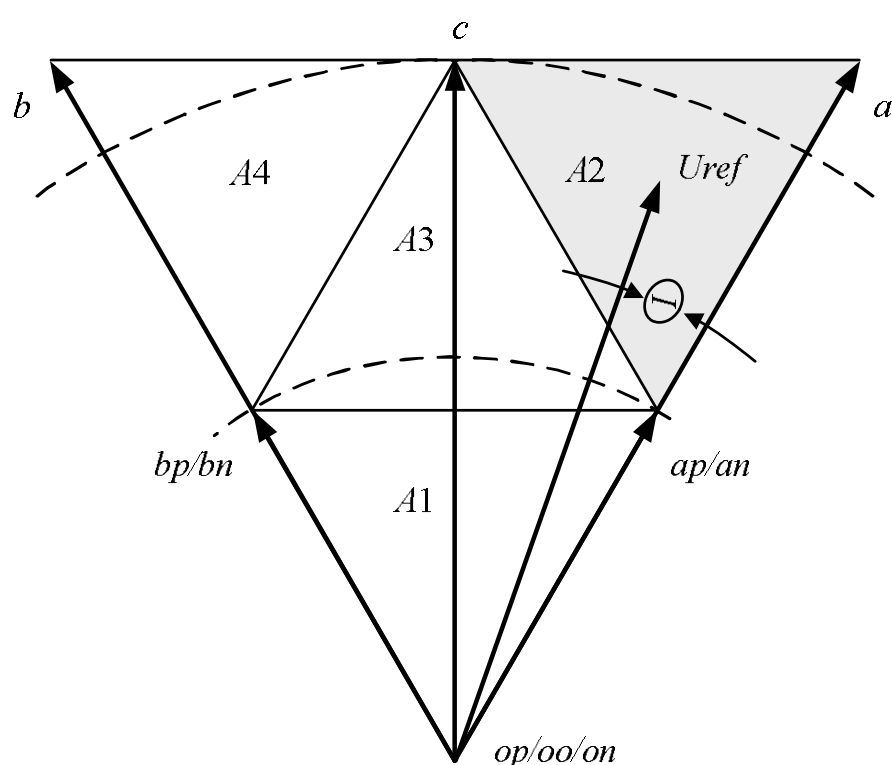


Рис. 2. Базовые векторы и области A1-A4 сектора A

#### ИЗМЕНЕНИЕ ШАБЛОНОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОДУЛЯЦИИ

В процессе широтно-импульсной модуляции изменяются два основных параметра вектора задающего напряжения: коэффициент модуляции  $k$ , характеризующий амплитуду вектора, и его угловое положение  $\theta$  [12]. При неизменном коэффициенте модуляции, вектор  $U_{ref}$  вращается по окружности радиусом  $k$ .

На рис. 3, а представлен сектор A, в котором изменение угла  $\theta$  происходит в диапазоне от 0 до 60°. В секторе показаны дуги окружностей, на которых равномерно расположены точки, изображающие положение задающего вектора напряжения в фиксированные моменты времени и следующие друг за другом с периодом ШИМ. Число точек на дуге окружности в пределах сектора соответствует числу элементарных циклов. Выполним расчет количества элементарных циклов  $N_R$ , соответствующих одному сектору. Эта величина зависит от частоты ШИМ и частоты выходного напряжения инвертора.

Для инверторов большой мощности примем частоту ШИМ равной  $f_{PWM} = 450$  Гц. Для мощных прокатных двигателей номинальная частота первой гармоники напряжения  $f_1$  составляет величину, значительно меньшую промышленной – порядка 20 Гц. Количество элементарных циклов за четверть периода  $N_S$  рассчитывается по формуле

$$N_S = \frac{f_{PWM}}{f_1} = \frac{450}{20} = 22,5. \quad (1)$$

Следует отметить, что величина  $N_S$  обратно пропорционально частоте вращения двигателя и по мере ее снижения число переключений необходимо увеличивать, что способствует улучшению качества кривой выходного напряжения.

Расчет показателя  $N_R$  выполним по формуле

$$N_R = \frac{2}{3} N_S = \frac{2}{3} \cdot 22,5 = 15, \quad (2)$$

где коэффициент  $2/3$  связывает угловые длительности сектора 60° и четверти периода 90°.

На рис. 3, а количество точек, расположенных на дуге окружности, равно  $N_R$ . При этом радиусы окружностей соответствуют различным значениям коэффициента модуляции  $k$ , которые подобраны таким образом, что в область A3 попадает целое нечетное число точек 1, 3, ..., 15.

Нижняя дуга окружности на рис. 3, а, включающая в себя 15 точек в области A3, ограничена коэффициентом модуляции  $k=0,567$ ; верхняя - включает 1 точку в области A3 с коэффициентом  $k=1,0$ . Совокупность всех точек, изображенных на рис. 3, а, образует диапазон I коэффициента модуляции (рис. 3, б). В пределах этого диапазона ( $0,567 < k < 1,0$ ) используются шаблоны циклов переключения для областей A2, A3 и A4. В следующем диапазоне II ( $0,5 < k < 0,567$ ) циклы переключений по мере уменьшения коэффициента модуляции перемещаются из области A3 в A1; соответственно диапазон II характеризуется использованием шаблонов A3 и A1. В диапазоне III ( $0 < k < 0,5$ ) участвует только шаблон A1.

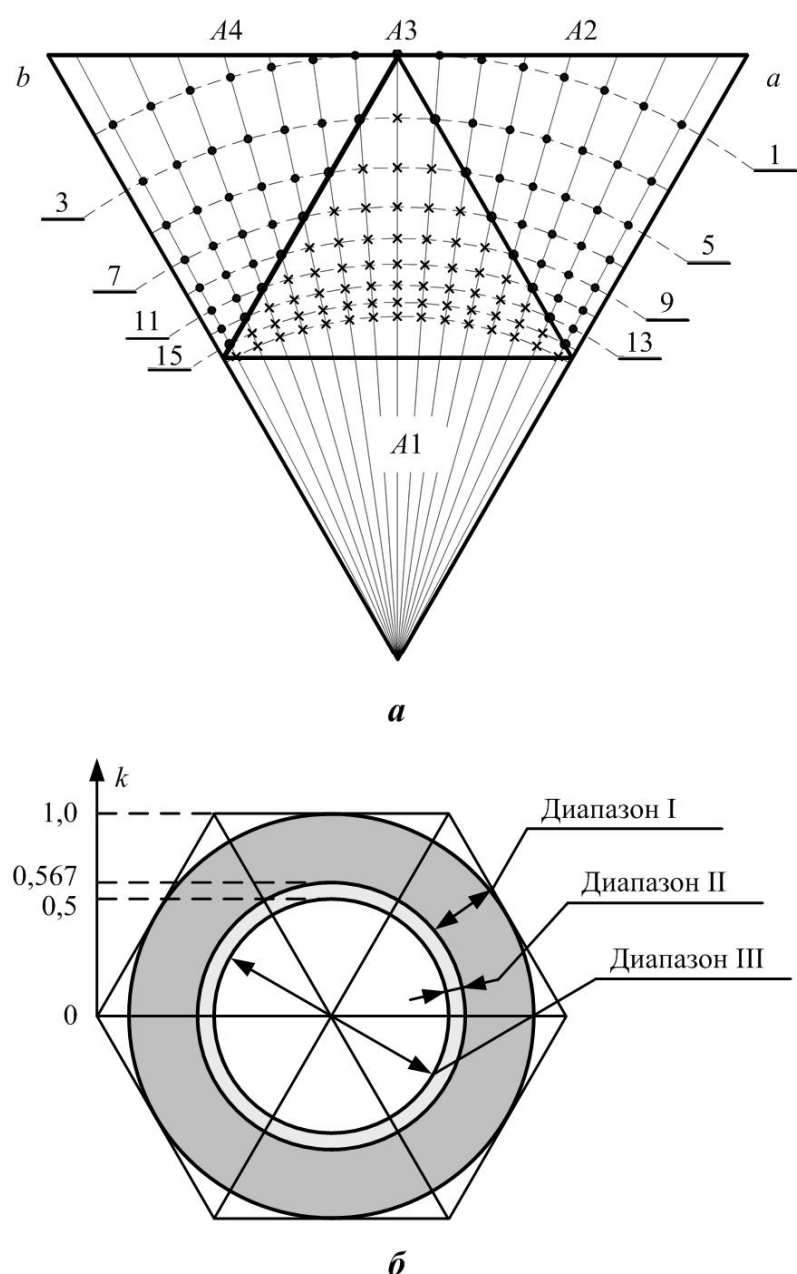


Рис. 3. Изменение числа элементарных циклов переключения в области  $A3$  в зависимости от коэффициента модуляции  $k$  для *диапазона I* (а), *диапазоны I, II, III* коэффициента модуляции (б)

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ШАБЛОНОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Снижение числа переключений силовых ключей инвертора и, следовательно, уменьшение коммутационных потерь при сохранении частоты модуляции предлагается осуществлять за счет применения комплекса из трех решений.

1. Классические шаблоны переключений сформированы таким образом, что каждый из трех базовых векторов используется в них дважды. В результате в начале и конце шаблона расположен один и тот же вектор. Такой подход позволяет легко соединять шаблоны последовательно между собой, но увеличивает число переключений.

Для отработки фиксированных положений задающего вектора напряжения в качестве элементарных циклов предлагается использовать левую или правую половину классического шаблона переключений  $A2$ :

$$A2p = (ap - c - a - an); A2n = (an - a - c - ap).$$

Это справедливо и для классического шаблона области  $A4$ :

$$A4p = (bp - b - c - bn); A4n = (bn - c - b - bp).$$

Во введенных обозначениях индекс  $p$  или  $n$  совпадает с полярностью вектора  $ap$  или  $an$ , расположенного в начале шаблона переключения.

Применение укороченных шаблонов  $A2p$ ,  $A2n$ ,  $A4p$  и  $A4n$  позволяет снизить число переключений силовых ключей в два раза.

2. В классической методике пространственно-векторной (ПВ) модуляции допускается стыковка шаблонов разноименными векторами. Например, переход из области  $A2$  в  $A3$  предполагал смену вектора  $ap$  на  $bp$ , что вносило дополнительные переключения:

$$A2 \rightarrow A3;$$

$$\begin{aligned} (ap - c - a - an) - (an - a - c - \underline{ap}) \rightarrow \\ \rightarrow (\underline{bp} - ap - c - bn - an) - \\ - (an - bn - c - ap - bp). \end{aligned}$$

Для укороченных шаблонов предлагается ввести следующее правило: каждый последующий шаблон переключений должен начинаться с вектора, на котором закончился предыдущий шаблон. Это позволяет не вводить дополнительных переключений при стыковке шаблонов. В процессе вращения задающего вектора переход от одного элементарного цикла к другому (см. **рис. 3, а**) возможен как при сохранении области сектора, так и со сменой области. В качестве примера показаны два последовательных перехода – в пределах области  $A2$  и из области  $A2$  в область  $A3$ :

$$A2n \rightarrow A2p \rightarrow A3n;$$

$$\begin{aligned} (an - a - c - \underline{ap}) \rightarrow (\underline{ap} - c - a - \underline{an}) \rightarrow \\ \rightarrow (\underline{an} - bn - c - ap - bp). \end{aligned}$$

В представленных выше переходах используются укороченные шаблоны, стыковка которых производится по одноименным векторам.

3. Укороченные шаблоны области  $A3$  содержат по два коротких вектора одинаковой полярности в начале и конце:

$$A3p = (bp - ap - c - bn - an);$$

$$A3n = (an - bn - c - ap - bp).$$

Необходимым условием обеспечения балансировки напряжений конденсаторов звена постоянного тока инвертора является присутствие в шаблоне как минимум двух коротких векторов разной полярности, например,  $ap/an$  или  $bp/bn$ . Предлагается ввести четыре новых шаблона переключений в области  $A3$ , в каждом из которых отсутствует один из коротких векторов:

$$A3p_a = (ap - c - bn - an);$$

$$A3p_b = (bp - ap - c - bn);$$

$$A3n_a = (an - bn - c - ap);$$

$$A3n_b = (bn - c - ap - bp).$$

Дополнительный индекс  $a$  или  $b$  указывает на тип вектора, с которого начинается шаблон.

Последнее решение позволяет дополнительно снизить число переключений, как показано на **рис. 4, а**, для *диапазона I*, где кривая 1 соответствует числу переключений  $N_Q$  за четверть периода при использовании классических шаблонов; кривая 2 – при использовании укороченных шаблонов в областях  $A2$  и  $A4$ ; кривая 3 – при дополнительном введении шаблонов в области  $A3$  ( $A3p_a$ ,  $A3p_b$ ,  $A3n_a$  и  $A3n_b$ ). Величина  $N_{A3}$  указывает на число элементарных циклов в области  $A3$ .

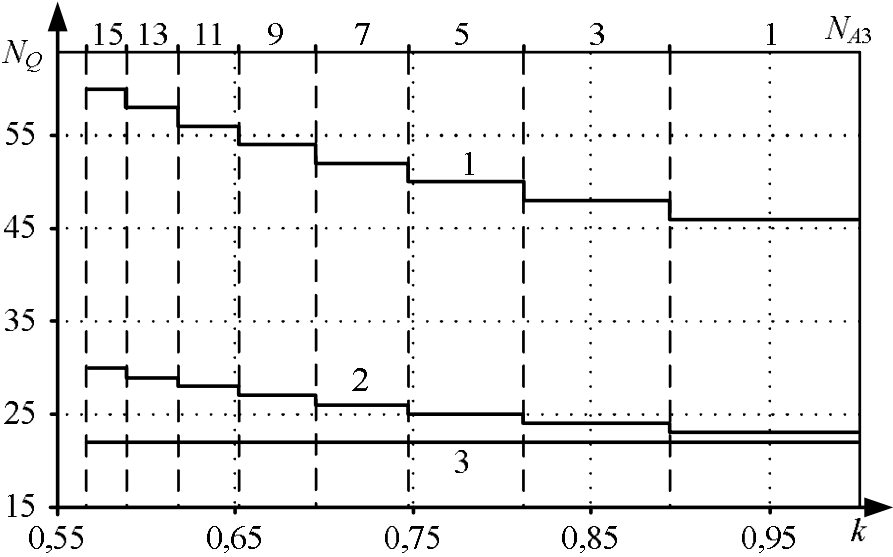


Рис. 4. Изменение числа переключений  $N_Q$  за четверть периода в зависимости от коэффициента модуляции  $k$  для различных шаблонов

Пример фазного напряжения инвертора при прохождении задающего вектора через сектор  $A$  при  $N_{A3}=15$  показан на рис. 5. График на рис. 5, а получен при использовании решений согласно п.1 и 2, а на рис. 5, б – всех трех предложенных решений. Из рис. 5 видно, что решение по п. 3 позволяет приблизительно в 2 раза снизить число переключений в фазе инвертора, которая меняет полярность в секторе  $A$ .

Результатом расчета траектории переключений ключей инвертора по методу синхронной ПВ ШИМ является последовательность шаблонов переключений, приведенная в таблице.

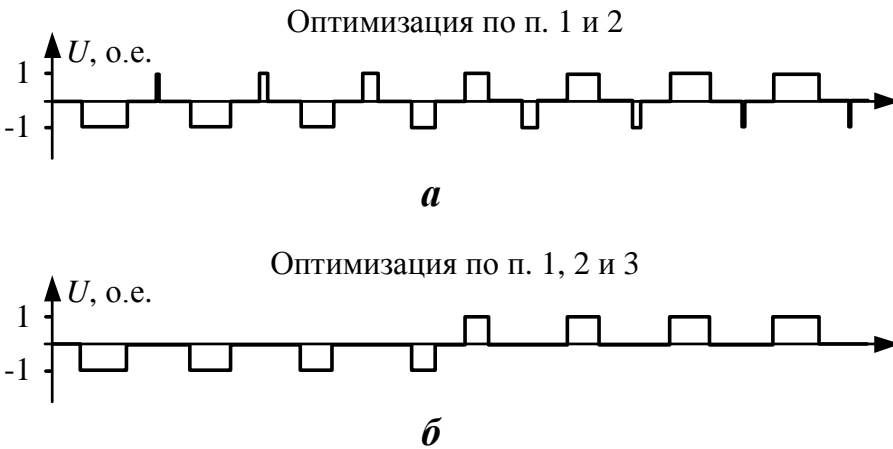


Рис. 5. Фазное напряжение инвертора при различных подходах к оптимизации шаблонов переключений

В столбцах этой таблицы указаны шаблоны переключений для каждого из пятнадцати элементарных циклов  $n=1...15$ , определяющих положение задающего вектора, как это показано на рис. 3, а. Строки таблицы несут информацию об интервалах изменения коэффициента модуляции, в пределах которых число элементарных циклов  $N_{A3}$  в области  $A3$  равно 1, 3, ..., 15.

Таким образом, шаблон переключений выбирается по известным значениям коэффициента модуляции  $k$  и номеру элементарного цикла  $n$ . Показатели  $k$  и  $n$  связаны с амплитудой  $U_m$  и угловым положением  $\Theta$ , град задающего вектора следующим образом:

$$k = \frac{U_m}{U_{dc}/\sqrt{3}}; \quad n = \text{ceil}\left(\Theta \frac{N_R}{60}\right), \tag{3}$$

где  $\text{ceil}(x)$  – функция округления до ближайшего большего целого числа.

Разработанные решения рассмотрены на примере диапазона  $I$  как наиболее сложного случая, в котором задействованы три области:  $A2$ ,  $A3$  и  $A4$ . В диапазоне  $II$  задействованы только две области  $A1$  и  $A3$  и оптимизация шаблонов переключений для этого диапазона осуществляется аналогичным образом. Поскольку диапазон  $III$  связан только с областью  $A1$ , то при оптимизации шаблонов переключений используются решения по п. 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью разработанной математической модели, реализованной в программной среде Matlab Simulink [13,14], проведены исследования работы трехуровневого NPC-инвертора при оптимизированном алгоритме переключений ПВ ШИМ для двух значений коэффициентов модуляции диапазонов  $I$  и  $II$  с целью оценки гармонического состава выходного напряжения.

На рис. 6, а показан график изменения фазного напряжения для коэффициента модуляции  $k=0,8$  (диапазон  $I$ ); на рис. 6, б приведен график изменения модуля базового вектора, который обозначается  $O$ ,  $S$ ,  $M$  или  $L$  в зависимости от типа выбранного вектора. Мгновенные значения выходного линейного напряжения инвертора показаны на рис. 6, в, а его гармонический состав представлен на рис. 6, г.

Шаблоны переключений в диапазоне  $I$  сектора  $A$

$k \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$N_{A3}$
0,894–1,0	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A2P$	$A3n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	1
0,812–0,894	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	3
0,747–0,812	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	5
0,695–0,747	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A2n$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A4n$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	7
0,652–0,695	$A2p$	$A2n$	$A2p$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A4p$	$A4n$	$A4p$	9
0,618–0,652	$A2p$	$A2n$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A4n$	$A4p$	11
0,589–0,618	$A2p$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A4p$	13
0,567–0,589	$A3p_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n_a$	$A3P_a$	$A3n$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	$A3n_b$	$A3p_b$	15



Результаты моделирования при  $k=0,503$  (диапазон II) приведены на рис. 7. Следует отметить, что при смене полярности фазного напряжения для коэффициентов модуляции в диапазоне II (рис. 7, а) в отличие от диапазона I (рис. 6, а) наблюдается двухполярные переключения в пределах одного шаблона. Это связано с

прохождением задающего вектора напряжения через область A1 (см. рис. 2), шаблоны которой содержат короткие S и нулевые O базовые векторы. В свою очередь, для случая на рис. 6, б применяются шаблоны, в которых задействованы средние M и длинные L базовые векторы, а нулевые O не используются.

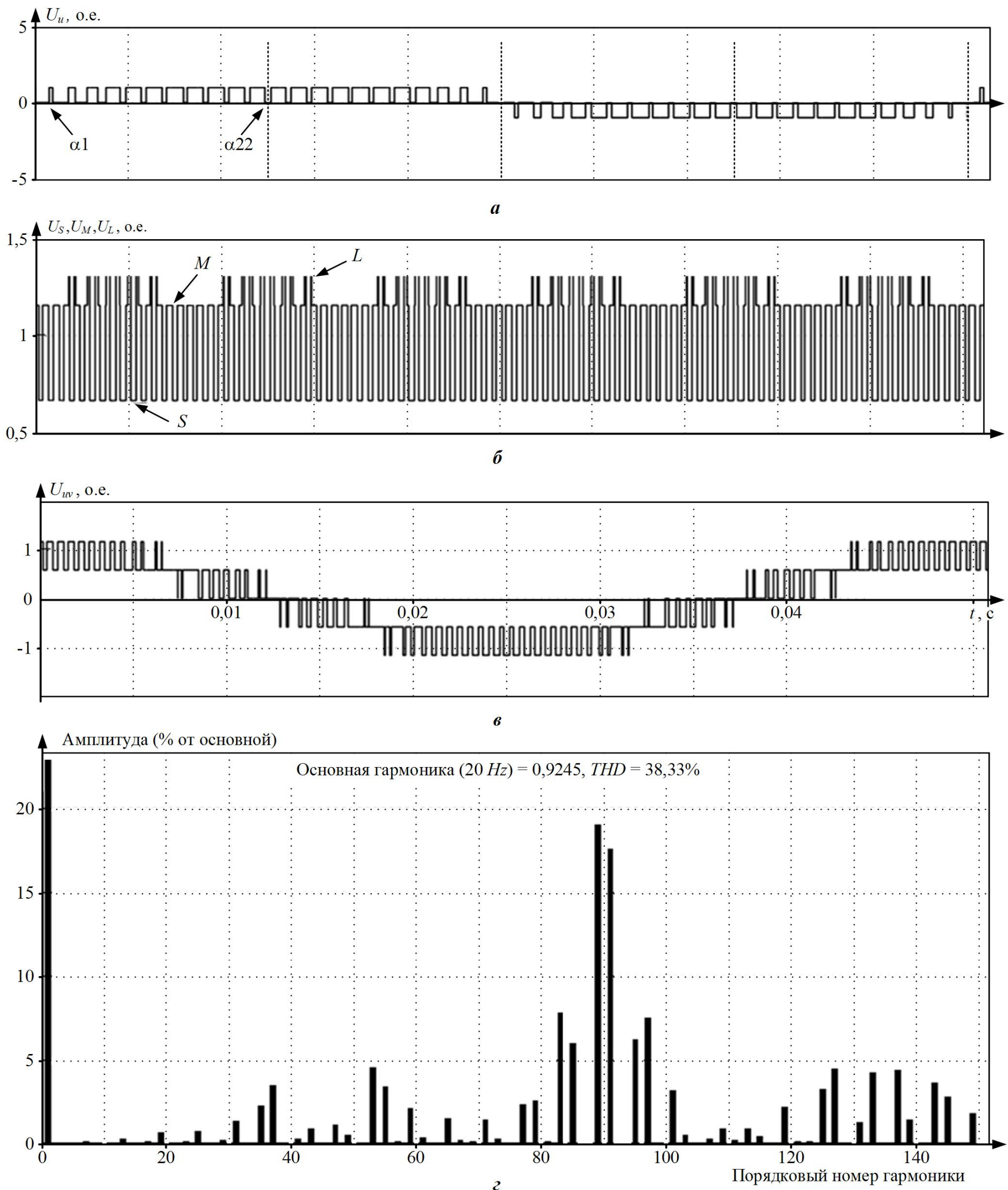


Рис. 6. Результаты моделирования при  $k=0,8$  и оптимизированных шаблонах переключения (а – фазное напряжение; б – модуль базового вектора; в – линейное выходное напряжение инвертора; z – гармонический спектр выходного линейного напряжения инвертора)

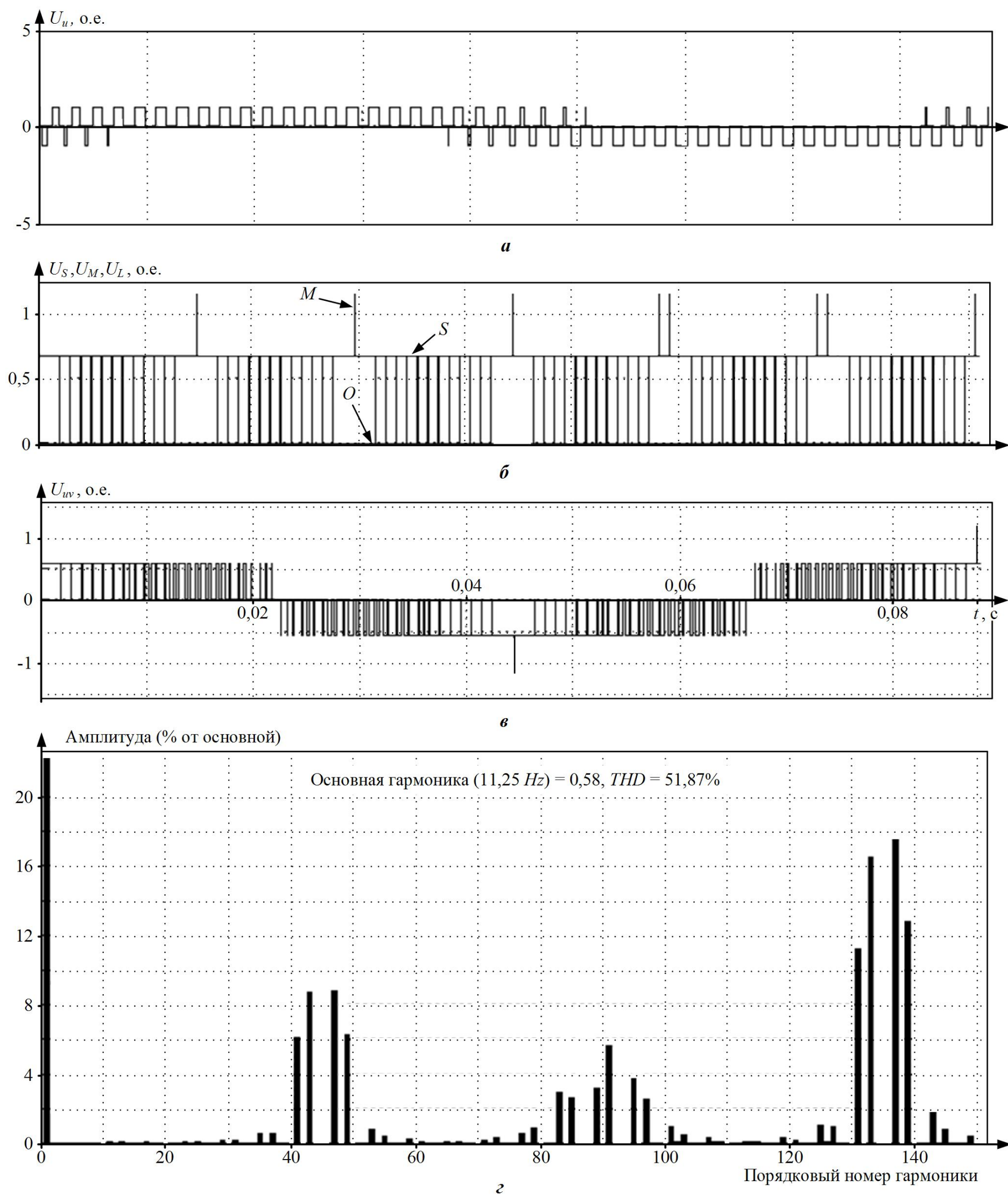


Рис. 7. Результаты моделирования при  $k=0,503$  и оптимизированных шаблонах переключения

Число уровней в кривой линейного напряжения инвертора зависит от значения коэффициента модуляции. В диапазоне I линейное напряжение имеет 5-уровневую форму (рис. 6, в), в диапазоне II – 3-уровневую (рис. 7, в).

Гармонический состав линейного напряжения инвертора существенно меняется при уменьшении коэффициента модуляции. В первом случае  $k=0,8$  наиболее значимыми гармониками являются 89-я и 91-я (см. рис. 6, г), амплитуды которых достигают 18%. Во втором случае  $k=0,503$  область наиболее значимых гармо-

ник переместилась в диапазон со 133-й по 137-ю с такой же амплитудой. В общем, при сравнении графиков на рис. 6, г и рис. 7, г следует заметить, что произошло перераспределение значимых гармоник на частотном диапазоне из области 83-я – 97-я в области 41-й – 49-й и 131-й – 139-й гармоник. При этом увеличилось общее содержание высших гармоник в кривой линейного напряжения  $THD_U$  с 38 до 52%. С учетом того, что гармоники напряжения имеют столько высокий порядок, следует ожидать, что их присутствие в токе будет весьма незначительным.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований оптимизированных алгоритмов переключений векторной ШИМ для трехуровневого NPC-инвертора позволяют сделать следующие выводы:

– использование оптимизированных шаблонов позволило снизить число переключений силовых ключей. Этот факт особенно важен при работе инверторов в составе мощных электроприводов, где частота выходного напряжения изменяется в пределах десятков герц;

– укороченные шаблоны переключений не привели к существенному ухудшению гармонического состава напряжения и наиболее значимые гармоники при разных значениях коэффициента модуляции находятся в области высоких частот. Следовательно, искажение синусоидальности кривой выходного тока инвертора при использовании оптимизированных алгоритмов переключения окажется незначительным. Это связано с тем, что проявление гармоник более высоких частот в токе ограничится большим реактивным сопротивлением индуктивных элементов.

Отмеченные результаты показывают, что предложенные оптимизированные алгоритмы пространственно-векторной ШИМ с уменьшенным числом переключений в шаблонах позволяют значительно снизить коммутационные потери трехуровневого NPC-инвертора и сохранить приемлемый гармонический состав кривой выходного линейного напряжения инвертора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walczyna A.M., Hill R.J. Space Vector PWM Strategy for 3Level Inverters With Direct Self-Controls. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, vol. 4, pp. 152-157.
2. Rodriquez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.
3. Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора / Абдулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Никифоров Г.В. // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 72-77.
4. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol. 1, pp. 197-203.
5. Yamanaka K., Hava A.M., Kirino H., Tanaka Y., Koga N., Kume T. A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1572-1580.
6. Mekhilef S., Khudhur H.I., Belkamel H. DC link Capacitor Voltage Balancing in Three Level Neutral Point Clamped Inverter. IEEE 13<sup>th</sup> Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2012, pp. 1-4.
7. Celanovic N., Boroyevich D. A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problem in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source PWM Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, vol. 15, no.2, pp. 242-249.
8. Das S., Narayanan G. Novel Switching Sequences for a Space-Vector-Modulated Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1477-1487.
9. Gupta A.K., Khambadkone A.M. A Simple Space Vector PWM Scheme Operate a Three-Level NPC Inverter at High Modulation Index. Conference Record of the Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting, 2005, vol. 3, pp. 1657-1664.
10. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 11-15.
11. Busquets-Monge S., Somavilla S., Bordonau J., Boroyevich D. The Capacitor Voltage Balance for the Neutral-PointClamped Converter Using the Virtual Space Vector Concept with Optimized Spectral Performance. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135.
12. Zhou D. A Self-Balancing Space Vector Switching Modulator for Three-Level Motor Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, vol. 17, no. 6, pp. 1024-1031.
13. Abdulvelev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P. Space-vector pulse-width modulation of a three-level NPC-inverter at low switching frequency. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW) on Russia, 2016, pp. 476-481.
14. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 239 с.

Поступила в редакцию 18 января 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SWITCHING PATTERNS FORMATION OF A THREE-LEVEL INVERTER WITH SPACE VECTOR WIDTH-PULSE MODULATION

Ildar R. Abdulvelev

Assistant Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: leggyild@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>.

Timur R. Khrashin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn\_mgn@mail.ru.

Rauza R. Abdulveleeva

Ph.D. (Pedagogic), Associate Professor, Electric Power and Electrical Engineering Department, Metallurgical Technology Faculty, National University of Science and Technology "MISIS" (Novotroitsk branch), Novotroitsk, Russia.

Valeriy I. Kosmatov

Ph.D. (Engineering), Professor, Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article describes the methods of forming switching patterns of a three-level inverter with space-vector pulse-width modulation (PWM). Patterns are a combination of switching of the three nearest vectors from their set represented in the form of a well-known hexagon of basic vectors. The formation of the reference vector involving three basic vectors is known in the literature as NTV (Nearest Three Vectors). Depending on the magnitude of the modulation index taking values from 0 to 1, there are three different ranges. The aim of the research of this article is to optimize switching patterns in all ranges in order to reduce the number of commutation of inverter switches of high-power electric drives. The analysis of the inverter output voltage harmonics is given for different values of the modulation index and an optimized switching algorithm. It is noted that the optimized vector PWM algorithms with a reduced number of switching makes it possible to reduce switching losses and preserve the acceptable harmonic composition of the inverter output voltage. The results of the study were obtained on the basis of simulation modeling in the Matlab Simulink environment.

**Keywords:** Three-level NPC-inverter, space vector pulse-width modulation, switching patterns, modulation index.

#### REFERENCES

1. Walczyna A.M., Hill R.J. Space Vector PWM Strategy for 3Level Inverters with Direct Self-Controls. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, vol.4, pp. 152-157.
2. Rodriquez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.
3. Abdulveleev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P., Nikiforov G.V. Basic Principles of Space Vector Modulation for Three-Level NPC-Inverters. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4 (33), pp. 72-77 (in Russian).
4. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
5. Yamanaka K., Hava A.M., Kirino H., Tanaka Y., Koga N., Kume T. A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1572-1580.
6. Mekhilef S., Khudhur H.I., Belkamel H. DC link Capacitor Voltage Balancing in Three Level Neutral Point Clamped Inverter. IEEE 13<sup>th</sup> Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2012, pp. 1-4.
7. Celanovic N., Boroyevich D. A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problem in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source PWM Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 242-249.
8. Das S., Narayanan G. Novel Switching Sequences for a Space-Vector-Modulated Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1477-1487.
9. Gupta A.K., Khambadkone A.M. A Simple Space Vector PWM Scheme Operate a Three-Level NPC Inverter at High Modulation Index. Conference Record of the Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting, 2005, vol. 3, pp. 1657-1664.
10. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 11-15.
11. Busquets-Monge S., Somavilla S., Bordonau J., Boroyevich D. The Capacitor Voltage Balance for the Neutral-PointClamped Converter Using the Virtual Space Vector Concept with Optimized Spectral Performance. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135.
12. Zhou D. A Self-Balancing Space Vector Switching Modulator for Three-Level Motor Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, vol. 17, no. 6, pp. 1024-1031.
13. Abdulveleev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P. Space-vector pulse-width modulation of a three-level NPC-inverter at low switching frequency. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW) on Russia, 2016, pp. 476-481.
1. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrashin T.R. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatii: uchebnoe posobie* [Modeling of electrotechnical complexes of industrial enterprises: textbook], Magnitogorsk, 2014, 239 p. (in Russian)

Абулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Абдулвелеева Р.Р., Косматов В.И. Формирование шаблонов переключений трехуровневого инвертора с векторной широтно-импульсной модуляцией // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 45-52. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-45-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-45-52)

Abdulveleev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P., Abdulveleeva R.R., Kosmatov V.I. Switching Patterns Formation of a Three-Level Inverter with Space Vector Width-Pulse Modulation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 45-52. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-45-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-45-52)