

## ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ АЛГОРИТМОВ МОДУЛЯЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХУРОВНЕВЫМ ИНВЕРТОРОМ

С целью выявления наилучшего алгоритма управления выполнены исследования влияния модуляционных алгоритмов управления на энергетические характеристики двухуровневого автономного инвертора преобразователя частоты. Исследования выполнялись методами математического и имитационного моделирования. Составлялись уравнения математического описания с учетом ряда общепринятых допущений. Составлялась эквивалентная схема двухуровневого автономного инвертора. Производились сравнения алгоритмов широтно-импульсной модуляции с несущими сигналами различной формы и частоты. Применялись три различные формы несущего сигнала: треугольная, пилообразная с задним фронтом и пилообразная с передним фронтом. Исследования проводились на частотах 3000, 6000 и 9000 Гц. Были сделаны выводы об идентичности спектрального состава переднего и заднего фронта пилообразного сигнала, также отмечено, что при треугольной форме сигнала часть гармоник, присутствовавших при пилообразной форме, удаляется, то есть треугольная форма обеспечивает лучший результат работы автономного инвертора. Также при увеличении частоты несущего сигнала было отмечено, что пакеты импульсов появляются на разных номерах гармоник, смещаются, а значения амплитуды и коэффициента искажения уменьшаются, то есть лучшие показатели были получены при максимальной исследуемой частоте. При исследовании напряжения на выходе дросселей при разной частоте несущего сигнала было отмечено, что при большем значении частоты пульсации выходного напряжения уменьшаются. Дроссели не устраняют гармоники, а лишь уменьшают их амплитуду. На основании результатов сделаны выводы, что алгоритм с треугольным несущим сигналом и максимальной частотой обеспечивает лучший гармонический состав выходного напряжения преобразователя частоты.

**Ключевые слова:** электропривод, преобразователь частоты, имитационная модель, автономный инвертор, широтно-импульсная модуляция.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных электроприводах для плавного регулирования электромагнитных и механических переменных электропривода применяются преобразователи частоты. Схема типового преобразователя частоты представлена на **рис. 1**. На выходе преобразователя частоты устанавливается 2-уровневый автономный инвертор (АИ). Для управления 2-уровневым АИ используется модуляционная система управления, которая входит в состав системы управления электроприводом, от алгоритмов которой зависят энергетические характеристики преобразователя частоты (ПЧ) и электропривода в целом. Наибольшее распространение получили алгоритмы синусоидальной ШИМ, модификация которых может выполняться изменением формы несущего сигнала. Исследование данной тематики позволяет сформулировать рекомендации по выбору формы и частоты несущего сигнала.

Для управления транзисторами 2-уровневого АИ система ШИМ формирует коммутационные функции, которые являются управляющими сигналами. Для формирования коммутационных функций используется два сигнала:

- управляющий;
- несущий.

От формы и параметров несущего сигнала зависят энергетические характеристики автономного инвертора, а именно:

- форма напряжения;

- спектральный состав напряжения;
- коэффициент искажения.

Используя треугольный и пилообразный сигналы и изменяя их частоту, проводим исследования с использованием MatLab Simulink посредством имитационного и математического моделирования.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХУРОВНЕВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Для имитационного моделирования работы двухуровневого АИ с возможностью исследования характеристик различных алгоритмов управления необходимо решить следующие задачи: принять допущения; составить эквивалентную схему; составить математическое описание АИ; выполнить синтез алгоритма ШИМ; составить структурную схему математического описания и системы управления; реализовать имитационную модель с использованием программы MatLab; провести исследование и анализ энергетических характеристик.

При составлении уравнений математической модели двухуровневого АИ используются общепринятые допущения об идеальности полупроводниковых ключей, а также выполняется переход к эквивалентной схеме. Эквивалентная схема двухуровневого АИ представлена на **рис. 2**. На **рис. 2** приняты следующие обозначения:  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$  – идеальные ключи инвертора;  $U_{dc}$  – эквивалентный источник напряжения;  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  – коммутационные функции ключей;  $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения;  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  – линейные напряжения;  $Z_{э\text{кв}}$  – эквивалентная нагрузка.

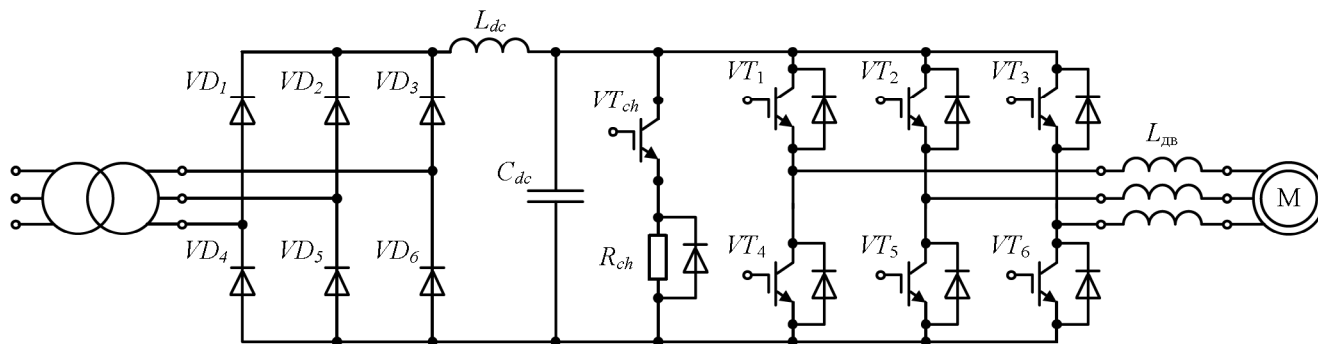


Рис. 1. Схема типового преобразователя частоты

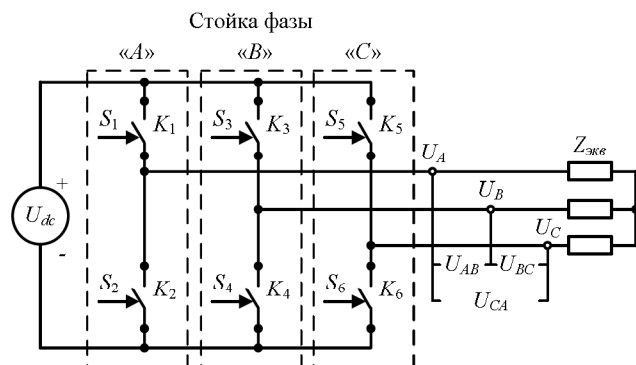


Рис. 2. Эквивалентная схема двухуровневого автономного инвертора

Математическую модель моторных дросселей можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dU_{sA}}{dt} = \frac{R_{dr}}{L_{dr}}(U_{iA} - U_{sA}), \\ \frac{dU_{sB}}{dt} = \frac{R_{dr}}{L_{dr}}(U_{iB} - U_{sB}), \\ \frac{dU_{sC}}{dt} = \frac{R_{dr}}{L_{dr}}(U_{iC} - U_{sC}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_{dr}$  и  $L_{dr}$  – сопротивление и индуктивность обмотки дросселя.

Фазное напряжение на выходе 2-уровневого АИ выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} U_{iA} = U_{dc} \left( +\frac{2}{3}S_A - \frac{1}{3}S_B - \frac{1}{3}S_C \right) \\ U_{iB} = U_{dc} \left( -\frac{1}{3}S_A + \frac{2}{3}S_B - \frac{1}{3}S_C \right) \\ U_{iC} = U_{dc} \left( -\frac{1}{3}S_A - \frac{1}{3}S_B + \frac{2}{3}S_C \right) \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{dc}$  – напряжения на конденсаторах звена постоянного тока (входное напряжение инвертора);  $U_{iA}$ ,  $U_{iB}$ ,  $U_{iC}$  – напряжения выходных фаз (выходное напряжение инвертора).

Уравнения для описания стоек 2-уровневого АИ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} S_A &= 1, \text{ если } S_1 = 1, S_2 = 0, \\ S_A &= 0, \text{ если } S_1 = 0, S_2 = 1, \\ S_B &= 1, \text{ если } S_3 = 1, S_4 = 0, \\ S_B &= 0, \text{ если } S_3 = 0, S_4 = 1, \\ S_C &= 1, \text{ если } S_5 = 1, S_6 = 0, \\ S_C &= 0, \text{ если } S_5 = 0, S_6 = 1, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  – модуляционные функции транзисторов;  $S_A, S_B, S_C$  – модуляционные функции стоек АИ.

Закон управления состоянием стойки транзисторов АИ (закон формирования коммутационной функции) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{если } U_{sA}^* > U_{set} &\Rightarrow S_A = 1, \\ \text{если } U_{sA}^* < U_{set} &\Rightarrow S_A = 0, \\ \text{если } U_{sB}^* > U_{set} &\Rightarrow S_B = 1, \\ \text{если } U_{sB}^* < U_{set} &\Rightarrow S_B = 0, \\ \text{если } U_{sC}^* > U_{set} &\Rightarrow S_C = 1, \\ \text{если } U_{sC}^* < U_{set} &\Rightarrow S_C = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

#### ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХУРОВНЕВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Имитационная модель двухуровневого АИ, реализованная в MatLab на основе уравнений (1) – (4), представлена на **рис. 3**. Модель двухуровневого автономного инвертора с возможностью исследования влияния следующих факторов, таких как частота и форма несущего сигнала, различных алгоритмов и анализа характеристик инвертора включает в себя: ШИМ, инвертор, дроссели.

Для управления 2-уровневыми АИ могут использоваться три типа сигналов:

- треугольный (**рис. 4, а**);
- пилообразный с передним фронтом (**рис. 4, б**);
- пилообразный с задним фронтом (**рис. 4, в**).

На **рис. 5** представлены осциллограммы выходного напряжения автономного инвертора и моторных дросселей при частоте несущего сигнала 3000 Гц.

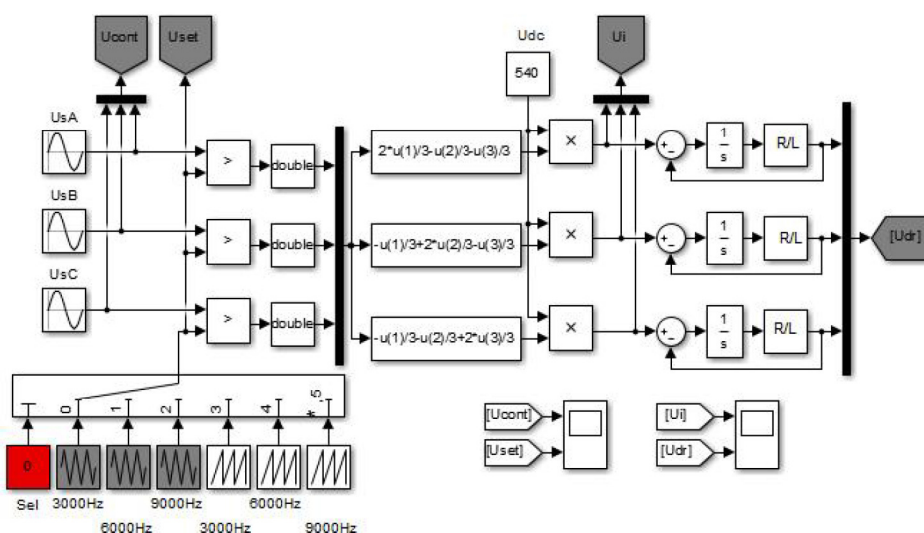


Рис. 3. Структурная схема математической модели двухуровневого АИ

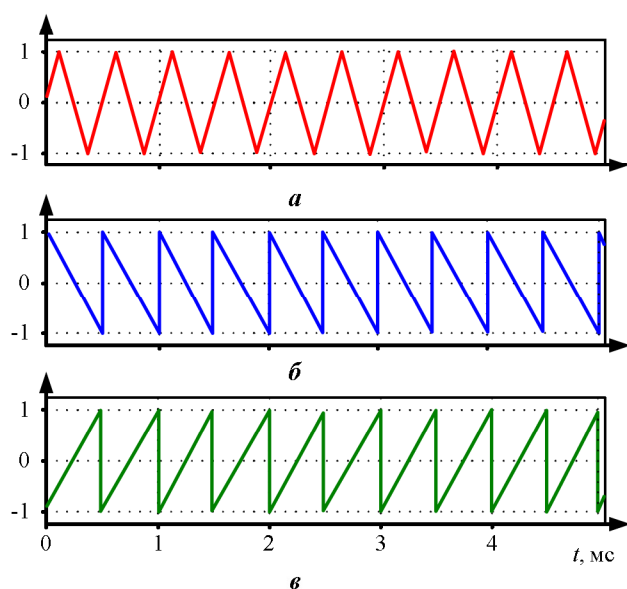


Рис. 4. Формы несущего сигнала

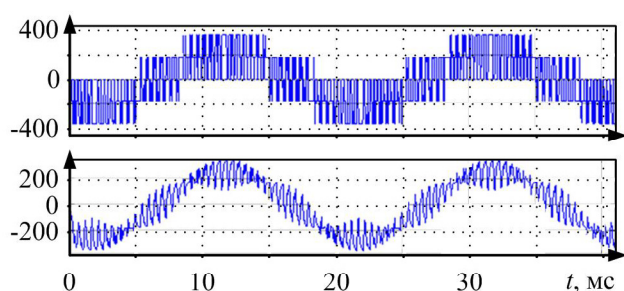


Рис. 5. Осциллограммы напряжений на выходе автономного инвертора и моторных дросселей

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХУРОВНЕВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

При исследовании алгоритмов управления ПЧ рассматриваем влияние:

- формы несущего сигнала на характеристики АИ;
- частоты несущего сигнала на характеристики АИ;
- дросселей на гармонические составляющие напряжения АИ.

При имитационном моделировании выполняется построение осциллограмм напряжения на выходе

автономного инвертора и моторных дросселей, а также исследуется их спектральный состав.

1. Влияние формы несущего сигнала на характеристики преобразователя частоты.

На рис. 6 показан спектральный состав выходного напряжения при различных формах сигнала: треугольной (рис. 6, а), пилообразной с задним фронтом (рис. 6, б) и пилообразной с передним фронтом (рис. 6, в). Исследования проводились на частоте 3000 Гц.

На основании полученных результатов делаем вывод, что спектральный состав переднего фронта совпадает со спектральным составом заднего фронта. При пилообразной форме плотность спектрального состава выше, чем при треугольной.

2. Влияние частоты несущего сигнала на характеристики преобразователя частоты.

Так как в первой части исследования было выявлено, что наилучший гармонический состав выходного напряжения АИ обеспечивается при треугольной форме несущего сигнала, то влияние частоты несущего сигнала будем рассматривать только при этой форме.

На рис. 7 показан спектральный состав выходного напряжения при треугольной форме сигнала на разной частоте.

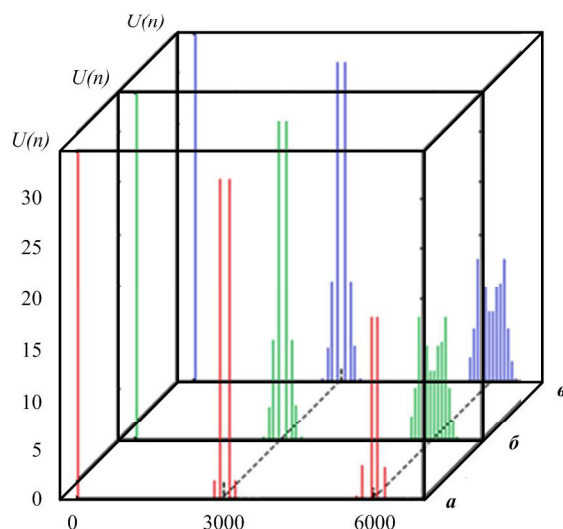


Рис. 6. Влияние формы несущего сигнала на гармонический состав выходного напряжения АИ

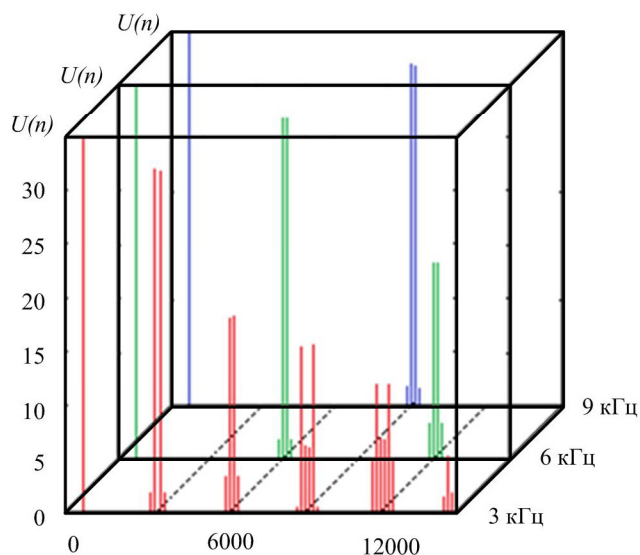


Рис. 7. Влияние частоты несущего сигнала на гармонический состав выходного напряжения АИ

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что наилучшее регулирование обеспечивается при частоте 9 кГц. Пакеты импульсов формируются на частоте, кратной частоте несущего сигнала и при увеличении частоты смещаются в область высоких частот.

3. Влияние дросселей на гармонические составляющие напряжения.

На рис. 8 представлены осциллограммы напряжения на выходе моторных дросселей при различной частоте несущего сигнала.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что наилучшее регулирование обеспечивается при частоте 9 кГц. При увеличении частоты несущего сигнала количество гармонических составляющих остается прежним, уменьшается лишь их амплитуда.

На рис. 9 представлен график зависимости коэффициента нелинейных искажений от отношения сопротивления к индуктивности дросселей.

В табл. 1 приведены значения коэффициента искажения напряжения на выходе автономного инвертора.

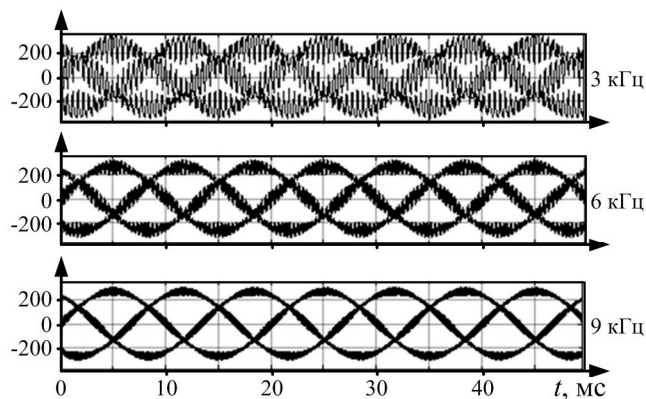


Рис. 8. Напряжение на выходе дросселей в зависимости от различной частоты несущего сигнала

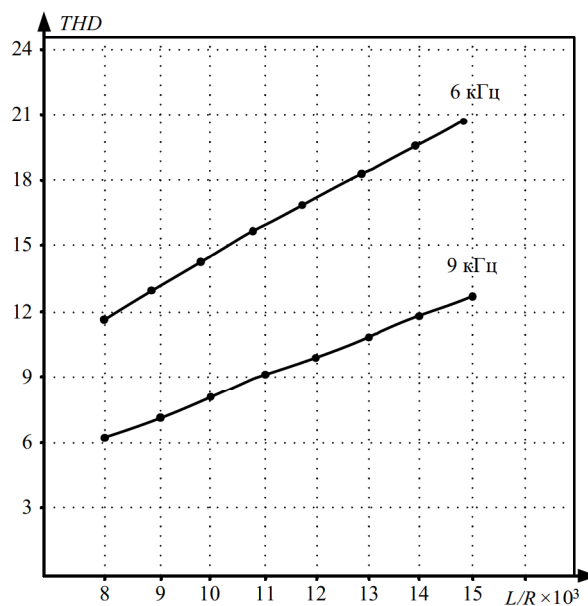


Рис. 9. Зависимость коэффициента нелинейных искажений (THD) от отношения сопротивления к индуктивности (добротности) дросселей

Таблица 1  
Значения коэффициента искажения напряжения на выходе автономного инвертора

$R/L$	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000
$THD_I$	68,9	68,9	68,9	68,9	68,9	68,9	68,9	68,9
$THD_{dr}$ (9 кГц)	6,1	6,8	7,6	8,3	9	9,8	10,5	11,2
$THD_{dr}$ (6 кГц)	11,9	13,4	14,7	16	17	18,6	19,8	21

В табл. 2–4 приведены значения амплитуд гармонических составляющих выходного напряжения автономного инвертора при разной частоте несущего сигнала: 3, 6 и 9 кГц соответственно.

Из них видно, что при увеличении частоты несущего сигнала гармонические составляющие выходного напряжения автономного инвертора сдвигаются в область высоких частот, при этом пакеты высших гармоник концентрируются около частот, кратных частоте несущего сигнала. Состав пакетов импульсов, находящихся около частоты, кратной несущей, также изменяется при изменении частоты несущего сигнала и становится наиболее благоприятным при ее повышении.

Таблица 2  
Амплитуда гармонических составляющих выходного напряжения автономного инвертора при частоте несущего сигнала 3 кГц

$f$	$f_1=3$ кГц				$f_2=6$ кГц				$f_3=9$ кГц			
	$n$	T	ПФ	ЗФ	$n$	T	ПФ	ЗФ	$n$	T	ПФ	ЗФ
0	60	—	—	—	120	—	—	—	180	—	—	—
$\pm 50$	59/61	—	18	18	119/121	18	7	7	179/181	—	4	4
$\pm 100$	58/62	32	31	31	118/122	—	10	10	178/182	6	5	5
$\pm 150$	57/63	—	—	—	117/123	—	—	—	177/183	—	—	—
$\pm 200$	56/64	2	10	10	116/124	—	10	10	176/184	15	6	6
$\pm 250$	55/65	—	3	3	115/125	3	12	12	175/185	—	3	3
$\pm 300$	54/66	—	—	—	114/126	—	—	—	174/186	—	—	—

Таблица 3

Амплитуда гармонических составляющих выходного напряжения автономного инвертора при частоте несущего сигнала 6 кГц

$f$	$f_1=3$ кГц				$f_2=6$ кГц				$f_3=9$ кГц			
	$n$	Т	ПФ	ЗФ	$n$	Т	ПФ	ЗФ	$n$	Т	ПФ	ЗФ
0	60	–	–	–	120	–	–	–	180	–	–	–
$\pm 50$	59/61	–	–	–	119/121	–	18	18	179/181	–	–	–
$\pm 100$	58/62	–	–	–	118/122	32	31	31	178/182	–	–	–
$\pm 150$	57/63	–	–	–	117/123	–	–	–	177/183	–	–	–
$\pm 200$	56/64	–	–	–	116/124	2	10	10	176/184	–	–	–
$\pm 250$	55/65	–	–	–	115/125	–	3	3	175/185	–	–	–
$\pm 300$	54/66	–	–	–	114/126	–	–	–	174/186	–	–	–

Таблица 4

Амплитуда гармонических составляющих выходного напряжения автономного инвертора при частоте несущего сигнала 9 кГц

$f$	$f_1=3$ кГц				$f_2=6$ кГц				$f_3=9$ кГц			
	$n$	Т	ПФ	ЗФ	$n$	Т	ПФ	ЗФ	$n$	Т	ПФ	ЗФ
0	60	–	–	–	120	–	–	–	180	–	–	–
$\pm 50$	59/61	–	–	–	119/121	–	–	–	179/181	–	18	18
$\pm 100$	58/62	–	–	–	118/122	–	–	–	178/182	32	31	31
$\pm 150$	57/63	–	–	–	117/123	–	–	–	177/183	–	–	–
$\pm 200$	56/64	–	–	–	116/124	–	–	–	176/184	2	10	10
$\pm 250$	55/65	–	–	–	115/125	–	–	–	175/185	–	3	3
$\pm 300$	54/66	–	–	–	114/126	–	–	–	174/186	–	–	–

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании влияния частоты и формы несущего сигнала на работу двухуровневого автономного инвертора преобразователя частоты можем сделать следующие выводы:

1. Вне зависимости от модификации алгоритма широтно-импульсного управления формирование выходного напряжения осуществляется в соответствии с заданием.

2. Форма несущего сигнала оказывает значительное влияние на гармонический состав выходного напряжения автономного инвертора.

3. Несущий сигнал пилообразной формы вне зависимости от фронта обеспечивает одинаковый гармонический состав выходного напряжения.

4. При использовании широтно-импульсной модуляции треугольного несущего сигнала гармонический состав выходного напряжения более благоприятен, чем при использовании пилообразного сигнала.

5. Частота несущего сигнала определяет частоту коммутации автономного инвертора, что, в свою очередь, определяет положение стационарных пакетов импульсов.

6. Пакеты импульсов напряжения формируются на частоте, кратной частоте несущего сигнала.

7. При увеличении частоты пакеты импульсов смещаются в область высоких частот.

8. Для согласования формы выходного напряжения автономного инвертора и нагрузки целесообразно и эффективно использовать моторные дроссели.

9. Наличие дросселей приводит к уменьшению амплитуды гармонических составляющих выходного напряжения при сохранении числа гармонических составляющих в спектре.

Таким образом, выбор способов модификации алгоритмов широтно-импульсного управления должен осуществляться комплексно. При выборе способов необходимо учитывать:

- форму несущего сигнала;
- частоту несущего сигнала;
- параметры дросселей.

Все эти параметры оказывают значительное влияние на энергетические характеристики преобразователей частоты и их совместимость с нагрузкой.

При практической реализации системы управления от правильности выбора зависят массогабаритные показатели дросселей и электропривода в целом, коэффициент полезного действия автономного инвертора двигателя и ПЧ в целом, требования к изоляции обмоток приводного двигателя, скорость их старения и срок службы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АCADEMA, 2004. 202 с.
2. Ершов М.С., Яризов А.Д. Энергосберегающий электропривод технологических установок трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов: учеб. пособие. М.: ИЦ. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. 247 с.
3. Голландцев Ю. А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 148 с.
4. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. вузов - М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.
5. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 70 с.
6. Лезнов Б. С., Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушодувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 306 с.
7. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / под ред. Крутякова Е.А. СПб.: Электросила, 2003. 172 с.
8. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога. 2017. 222 с.
9. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов / под редакцией Крутякова Е.А. Санкт-Петербург: ОАО «Силовые машины», ОАО «Электросила», 2004. 252 с.
10. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 2002.
11. Гейст А.В. Многоуровневый инвертор напряжения с четвертой стойкой в составе системы генерирования электрической энергии переменного тока // Сб. науч. тр. НГТУ. 2007. №4(50).

12. Филатов В. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT // Силовая электроника. №4. 2012.
13. Neumann K. Trends in semiconductor devices and impact on power electronics and electric drives // International Conference «Power electronics motion control». Conference Publication. Vol. 2. Warsaw, 1994.
14. Barats E.I. Energy Efficiency in Motor Driven System. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 550 p.

Поступила в редакцию 27 августа 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### INVESTIGATION OF BASIC ALGORITHMS OF MODULATION OF THE TWO-LEVEL INVERTER CONTROL SYSTEM

Anatoliy E. Kozyaruk

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of electric energy and electrical engineering, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, E-mail: kozjaruk\_ae@spmi.ru.

Bogdan Yu. Vasilev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of electric energy and electrical engineering, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: vasilev.bu@spmi.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4018-0507>.

Elena E. Sheludchenko

Master degree student, Department of electric energy and electrical engineering, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: elenka.sheludchenko@mail.ru.

Vendzhizuva Mbueen

Student, Department of electric energy and electrical engineering, Saint-Petersburg Mining University. Saint-Petersburg, Russia. E-mail: Vmbuende@dmil.com

In order to identify the best control algorithm, studies were made based on the effect of modulation control algorithms on the energy characteristics of a two-level autonomous inverter of a frequency converter. The research was carried out using mathematical and simulation methods. The equations of mathematical description were formulated taking into account a number of generally accepted assumptions. An equivalent circuit of a two-level autonomous inverter, comparisons of the algorithms of pulse-width modulation with carrier signals of various shapes and frequencies were made. Three different forms of the carrier signal were used: triangular, sawtooth with a trailing edge and sawtooth with a leading edge. The studies were performed at frequencies of 3000, 6000 and 9000 Hz. The conclusions were made about the identity of the spectral composition of the leading and trailing edges of the sawtooth signal, it was also noted that with the triangular waveform the part of the harmonics present in the sawtooth form is removed, that is, the triangular shape provides the best result of the operation of the autonomous inverter. Also, when the frequency of the carrier signal was increased, it was noted that the pulse packets appeared on different harmonic numbers, shifted, and the magnitude and distortion coefficient decreased, that is, the best indicators were obtained at the maximum frequency under study. When examining the voltage at the output of the chokes at a different frequency of the carrier signal, it was noted that at a higher value the pulsation frequencies of the output voltage decrease. Chokes do not eliminate harmonics but only reduce their amplitude. On the basis on the obtained results, it is concluded that the algorithm with a triangular carrier signal and maximum frequency provides the best harmonic composition of the output voltage of the frequency converter.

**Keywords:** Electric drive, frequency converter, autonomous inverter, pulse width modulation.

#### REFERENCES

1. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayushchiy asinkhronnyi elektropriwod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Moscow: ACADEMA, 2004. 202 p. (In Russian)
2. Ershov M.S., Yarizov A.D. *Energoberegayushchiy elektropriwod tekhnologicheskikh ustnovok truboprovodnogo transporta gaza, nefi i nefteproduktov* [Energy-saving electric drive of technological installations for pipeline transport of gas, oil and oil products]. Moscow: Publishing center of Gubkin oil and gas Institute. THEM. 2011. 247 p. (In Russian)
3. Hollandtsev Yu. A. *Ventilnye induktorno-reaktivnye dvigateli* [Ventilating inductor jet engines]. S.Peterburg: SSC RF - CRI "Electropribor", 2003. 148 p. (In Russian)
4. Ilyinskii N.F., Moskalenko V.V. *Elektropriwod: energo- i resursoberezhenie* [Power Drives: Energy and Resource Saving]. Moscow: Publishing Center "Akademiya", 2008. 208 p. (In Russian)
5. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. *Ventilno-induktornye dvigateli* [Gate-inductor motors]. Moscow: Izd. MPEI, 2003. 70 p. (In Russian)
6. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemyi priwod v nasosnykh i vozdukhodувnykh ustanovkakh* [Energy saving and adjustable drive in pumping and blowing plants] Moscow: Energo-atomizdat, 2006. 306 p. (In Russian)
7. Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovye polnostyu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet)* [Power fully-controlled semiconductor converters (simulation and calculation)], under the editorship of Krutyakov E.A. St. Petersburg: Electrosila, 2003. 172 p. (In Russian)
8. Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Elektromekhanotronnye komplekсы i ikh modelirovanie po vzaimosvyazannym podsystemam* [Electromechanotron complexes and their modeling based on interconnected subsystems]. St. Petersburg: Ladoga. 2017. 222 p. (In Russian)
9. Pronin M.V., Vorontsov A.G., Kalachikov P.N., Emelianov A.P. *Elektroprirody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami (modelirovanie, raschet, primeneniye)* [Electric drives and systems with electrical machines and semiconductor converters (simulation, calculation, application)]. Edited by Krutyakov E.A. Saint Petersburg: Power Machines Electrosila, 2004. 252 p. (In Russian)

10. Zinoviev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk: NSTU, 2002. (In Russian)
  11. A.V. Geist., Multilevel voltage inverter with a fourth rack in the system of generating electric power of alternating current. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Collection of scientific works of NSTU]. 2007, no. 4 (50). (In Russian)
  12. Filatov V. Two- and three-level inverters on IGBT. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2012. no. 4. (In Russian)
  13. Heumann K. Trends in semiconductor devices and impact on power electronics and electric drives. International Conference «Power electronics motion control». Conference Publication. Vol. 2. Warsaw, 1994.
  14. E.I. Barats. Energy Efficiency in Motor Driven System. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 550 p.
- 
- Козярук А.Е., Васильев Б.Ю., Шелудченко Е.Е., Мбуген В. Исследование базовых алгоритмов модуляции системы управления двухуровневым инвертором // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 4(41). С. 41-47. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-41-47](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-41-47)
- Kozyaruk A.E., Vasilev B.Yu., Sheludchenko E.E., Mbueen V. Investigation of Basic Algorithms of Modulation of the Two-level Inverter Control System. *Elektrotechnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 41-47. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-41-47](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-41-47)
-