

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.027.4:656.2

doi:10.30987/2658-6436-2022-1-80-88

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АЛГОРИТМАМИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Николай Валентинович Чуприна^{1✉}, Сергей Владимирович Седых²,
Александр Анатольевич Пугачев³, Владимир Петрович Маклаков⁴

^{1,2,3,4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ nikochuprina212@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8915-0926>

² Serezha.Sedyh2017@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3624-1255>

³ alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

⁴ maklakov-vp@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7107-8233>

Аннотация. Показана актуальность исследования электроприводов с асинхронными двигателями и преобразователями частоты, содержащими автономный инвертор напряжения с пространственно-векторной модуляцией; проведен краткий обзор исследований в этой области. Целью работы является разработка модели преобразователя частоты с алгоритмами пространственно-векторной модуляции средствами Matlab Simulink, пригодной для ее дальнейшего применения в моделях электроприводов переменного тока. Для достижения поставленной цели применены методы теории электропривода, численные методы, методы решения систем алгебраических уравнений, методы компьютерного моделирования. Модель преобразователя описана в неподвижной двухфазной системе координат. В качестве автономного инвертора напряжения выбрана классическая структура двухуровневого преобразователя. Адекватность разработанной модели подтверждают приведенные результаты ее применения для электропривода с асинхронным двигателем мощностью 5,5 кВт в статических и динамических режимах работы. Результаты работы позволили установить характер зависимости коэффициента гармонических искажений тока статора от момента сопротивления, частоты коммутации силовых ключей автономного инвертора напряжения и частоты тока статора при применении системы скалярного управления асинхронным двигателем.

Ключевые слова: преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, модуляция, асинхронный двигатель, коэффициент гармонических искажений

Для цитирования: Чуприна Н.В., Седых С.В., Пугачев А.А., Маклаков С.П. Моделирование электропривода переменного тока с алгоритмами пространственно-векторной модуляции // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №1 (15). С. 80-88. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-80-88.

Original article

Open Access Article

SIMULATION OF AC ELECTRIC DRIVE WITH SPACE-VECTOR MODULATION ALGORITHMS

Nikolay V. Chuprina^{1✉}, Sergey V. Sedykh², Alexander A. Pugachev³, Vladimir P. Maklakov⁴

^{1,2,3,4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

¹ nikochuprina212@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8915-0926>

² Serezha.Sedyh2017@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3624-1255>

³ alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

⁴ maklakov-vp@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7107-8233>

Abstract. The relevance of investigation of induction motor electric drives with frequency converters having voltage source inverter with space-vector modulation is shown. The brief survey of researches of such matter is carried out. The aim of this article is to develop mathematical and computer model of frequency converter with space-vector modulation algorithms by means of Matlab Simulink, this model has to be implemented into the Matlab models of AC electric drives with induction and synchronous motors. To achieve such an aim, it needs to introduce techniques of

electric drive theory, numerical techniques, techniques of algebraic equations system solution, techniques of computer simulation. The still two-phase framework is applied to describe the converter model. The two-level voltage source inverter is chosen for the investigation of modulation algorithms. To verify the mathematical model of space-vector modulation, the model of 5.5 kW induction motor is used. Induction motor and power switches are modelled by means of Matlab SimPowerSystems units. The results of simulation show the adequacy of the developed model in both steady state and transient modes. One can conclude the dependence of total harmonic distortion of the induction motor stator current from load torque, switching frequency of voltage source inverter's power switches and stator current frequency for the electric drive with scalar control system.

Keywords: frequency converter, voltage source inverter, modulation, induction motor, total harmonic distortion

For citation: Chuprina N. V., Sedykh S. V., Pugachev A. A., Maklakov V.P. Simulation of ac electric drive with space-vector modulation algorithms. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 1 (15). pp. 80-88. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-80-88.

Введение

Электроприводы с асинхронными двигателями (АД) в настоящее время являются самым распространенным типом электропривода в широком диапазоне мощностей разнообразных промышленных установок и различных транспортных средств. Такое широкое распространение обусловлено выгодными массогабаритными и экономическими показателями качества по сравнению к электроприводам с другими типами электрических двигателей. Применение АД в регулируемых электроприводах в большинстве случаев подразумевает использование полупроводниковых преобразователей частоты в цепи обмотки статора. Основная часть преобразователей выполнена по силовой схеме «выпрямитель – звено постоянного тока – автономный инвертор напряжения». Напряжение и частота тока статора регулируется посредством различных методов модуляции, реализуемых автономным инвертором напряжения (АИН).

Традиционно в электроприводах чаще всего применяют скалярную (синусную) широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), основы которой были разработаны в середине 60-х годов XX века [1]. Несмотря на то, что с тех пор появилось большое количество новых алгоритмов модуляции, ШИМ все еще является основным видом модуляции в преобразователях частоты как низковольтного, так и высоковольтного исполнений. Наиболее существенными недостатками, на устранение которых направлены новые разработки в этой области, являются достаточно высокий коэффициент гармонических искажений (КГИ) при работе с невысокими частотами коммутации, большие потери мощности полупроводников инвертора в динамических режимах работы при увеличении частоты коммутации, неполное использование напряжения звена постоянного тока [1].

Один из модифицированных методов модуляции описан в работе [2]. Согласно этому методу в состав напряжения предложено дополнительно вводить третью гармоники, что позволяет повысить коэффициент использования напряжения звена постоянного тока на 15,5 % без соответствующего повышения КГИ. Недостатком данного подхода является практическая невозможность определения точного значения амплитуды третьей гармоники напряжения.

Другой вариант совершенствования ШИМ позволяет уменьшить КГИ. Для этой цели в работе [3] предлагается применять переменную частоту коммутации полупроводников АИН. Недостатками этого варианта являются увеличение потерь мощности в динамических режимах и сложность определения текущего значения частоты коммутации.

Наиболее совершенным на данный момент является пространственно-векторная модуляция напряжения (ПВМ). Данный метод модуляции также позволяет повысить эффективность использования напряжения звена постоянного тока, снизить значение КГИ без увеличения потерь мощности в динамических режимах. Существует достаточно большое количество работ, посвященных исследованию ПВМ [1, 4 – 6]. В данной работе поставлена задача разработки имитационной модели электропривода с АД и АИН с ПВМ в программном комплексе *Matlab*, т.к. несмотря на многочисленные исследования общепринятой методики моделирования такого электропривода до сих пор нет.

Математическое описание преобразователя частоты с АИН с ПВМ

Функциональная схема силовой части преобразователя частоты показана на рис. 1 (на рис. 1 и далее приняты обозначения: U_d – напряжение на конденсаторе C звена постоянного тока; $VT1...VT6$ – транзисторы АИН), нагрузкой АИН является АД.

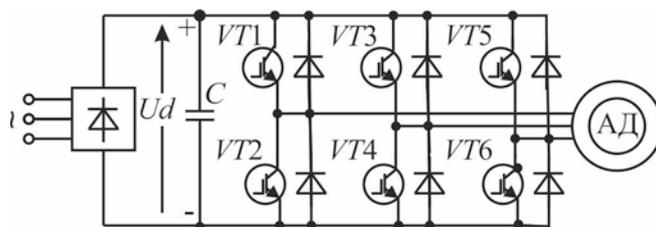


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя частоты
Fig. 1. Topology of frequency converter

Двухуровневый АИН, входящий в состав электропривода, генерирует 8 базовых векторов выходного напряжения $u_0...u_7$, два из которых (u_0 и u_7) являются нулевыми, как это показано в двухфазной системе координат xu на рис. 2.

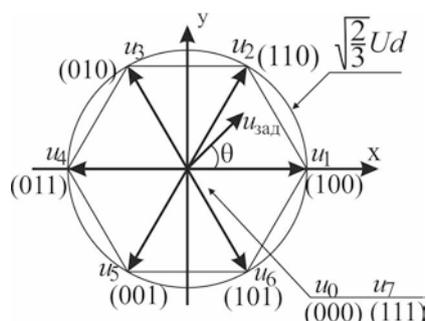


Рис. 2. Векторы выходного напряжения автономного инвертора напряжения
Fig. 2. Output voltage vectors of voltage source inverter

Математически базовые векторы выходного напряжения определяются следующей функцией:

$$u_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_d \cdot e^{j \cdot (k-1) \cdot \frac{\pi}{3}}, & \text{если } k = 1, 2 \dots 6; \\ 0, & \text{если } k = 0, 7, \end{cases} \quad (1)$$

где u_k – вектор напряжения; k – номер вектора.

Для предотвращения короткого замыкания конденсатора звена постоянного тока состояния транзисторов АИН должны описываться следующими функциями переключения:

$$S_i = 1 \Rightarrow (S_{i1}, S_{i2}) = (1, 0); \quad (2)$$

$$S_i = 0 \Rightarrow (S_{i1}, S_{i2}) = (0, 1), \quad (3)$$

где $i = a, b, c$.

Функции переключения (2), (3) обеспечивают следующее значение вектора выходного напряжения:

$$u = (2/3)^{1/2} (u_a + u_b e^{-j2\pi/3} + u_c e^{j2\pi/3}), \quad (4)$$

где u_a, u_b, u_c – фазные значения напряжений.

Отметим, что базовые векторы на рис. 2 образуют шесть секторов, номера которых n определяются из неравенства:

$$(n - 1) \cdot 60^\circ < \theta \leq 2 \cdot n \cdot 60^\circ, \quad (5)$$

где $n = 1, 2 \dots 6$; θ – угол вектора заданного напряжения $u_{\text{зад}}$, через проекции напряжения в осях x, y , определяется следующим образом:

$$\theta = \text{tg} \left(\frac{u_x}{u_y} \right), \theta \in [0, 2\pi]. \quad (6)$$

В отличие от алгоритмов ШИМ, где выходное напряжение формируется непосредственно в результате сравнения напряжения управления и опорного напряжения (чаще всего пилообразной формы), в АИН с ПВМ генерация выходного напряжения $u_{\text{зад}}$ происходит посредством сложения ненулевых и нулевых векторов определенной длительности. Таким образом, основными задачами при исследовании и разработке ПВМ является определение номеров соседних векторов выходного напряжения, обеспечивающих необходимое значение напряжения за период коммутации, а также длительностей функций переключений транзисторов АИН в пределах каждого периода коммутации T_k .

Рассмотрим решение первой задачи для напряжения $u_{\text{зад}}$ на рис. 2. В этом случае ненулевыми базовыми векторами являются векторы u_1 и u_2 ; нулевые векторы выбираются из условия соседнего кодирования состояний транзисторных стоек, т.е. для вектора u_1 нулевым является вектор u_0 , для вектора u_2 – вектор u_7 . Аналогично определяются базовые векторы и порядок их переключения для векторов заданного напряжения во всех остальных секторах. Последовательность переключений транзисторов АИН для симметричной последовательности приведена в табл. 1.

Последовательность переключений транзисторов АИН

Таблица 1

Switching sequence of voltage source inverter transistors

Table 1

Сектор	Последовательность переключений базовых векторов u_k						
	1	2	3	4	5	6	7
1	$u_0(000)$	$u_1(100)$	$u_2(110)$	$u_7(111)$	$u_2(110)$	$u_1(100)$	$u_0(000)$
2	$u_0(000)$	$u_3(010)$	$u_2(110)$	$u_7(111)$	$u_2(110)$	$u_3(010)$	$u_0(000)$
3	$u_0(000)$	$u_3(010)$	$u_4(011)$	$u_7(111)$	$u_4(011)$	$u_3(010)$	$u_0(000)$
4	$u_0(000)$	$u_5(001)$	$u_4(011)$	$u_7(111)$	$u_4(011)$	$u_5(001)$	$u_0(000)$
5	$u_0(000)$	$u_5(001)$	$u_6(011)$	$u_7(111)$	$u_6(011)$	$u_5(001)$	$u_0(000)$
6	$u_0(000)$	$u_1(100)$	$u_6(011)$	$u_7(111)$	$u_6(011)$	$u_1(100)$	$u_0(000)$

Для определения длительности функций переключения необходимо определить время включения соседних векторов. Это несложно сделать на основе тригонометрических соотношений, примененных к рис. 2, с учетом периодического переключения состояний. Отметим, что для симметричной последовательности переключения расчет можно вести только для первого полупериода, т.к. во втором полупериоде происходит зеркальное отражение состояний транзисторов. Модуль напряжения $u_{\text{зад}}$ можно записать так:

$$u_{\text{зад}} \cdot \frac{T_k}{2} = u_k \cdot T_a + u_{k+1} \cdot T_b, \quad (7)$$

где T_a и T_b – время включения векторов u_k и u_{k+1} в каждом периоде коммутации.

Определение времен осуществим с помощью разложения вектора $u_{\text{зад}}$ на действительную (проекция u_x на рис. 2) и мнимую (проекция u_y) части при условии

постоянства всех модулей всех векторов на периоде коммутации. С учетом выражений (1) и (7) получим:

$$T_a = \frac{u_{зад} \sqrt{2} \cdot T_k}{\pi U_d} \left(\sin \frac{n\pi}{3} \cos(n\omega T_k) - \cos \frac{n\pi}{3} \sin(n\omega T_k) \right); \quad (8)$$

$$T_b = \frac{u_{зад} \sqrt{2} \cdot T_k}{\pi U_d} \left(-\sin \frac{(n-1)\pi}{3} \cos(n\omega T_k) - \cos \frac{(n-1)\pi}{3} \sin(n\omega T_k) \right), \quad (9)$$

где ω – частота вращения вектора $u_{зад}$, $\omega = 2\pi f_s$, f_s – частота тока статора асинхронного двигателя (как нагрузки АИН).

Время включения нулевого вектора (нулевых векторов) распределяется поровну между векторами u_0 и u_7 :

$$T_0 = T_k - 2 \cdot (T_a + T_b). \quad (10)$$

Как видно из табл. 1 вектор u_0 применяется в начале и конце каждого периода, вектор u_7 – в середине.

Для определения длительности функций переключения приведем соответствующие временные диаграммы (на рис. 3 для примера показаны диаграммы функций переключения для первого и второго секторов). В соответствии с рис. 1 и выражениями (1), (2) $S_1 = (S_{VT1}, S_{VT2})$, $S_2 = (S_{VT3}, S_{VT4})$, $S_3 = (S_{VT5}, S_{VT6})$.

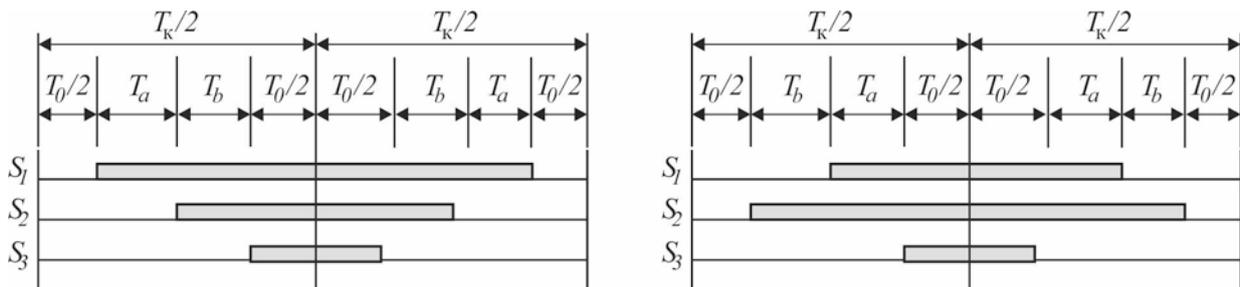


Рис. 3. Временные диаграммы функций переключения для первого (а) и второго (б) секторов
Fig. 3. Switching functions vs. time for first sector (a) and second sector (b)

На основании диаграмм (см. рис. 3) записываем выражения длительности функций переключения S_i для первых двух и всех последующих секторов n (табл. 2).

Таблица 2

Длительность функций переключения S_i в зависимости от секторов n

Table 2

Time intervals of switching functions for the different sectors

n	1	2	3	4	5	6
S_1	$S_1: T_a+T_b+T_0/2$	$S_1: T_a+T_0/2$	$S_1: T_0/2$	$S_1: T_0/2$	$S_1: T_b+T_0/2$	$S_1: T_a+T_b+T_0/2$
S_2	$S_2: T_b+T_0/2$	$S_2: T_a+T_b+T_0/2$	$S_2: T_a+T_b+T_0/2$	$S_2: T_a+T_0/2$	$S_2: T_0/2$	$S_2: T_0/2$
S_3	$S_3: T_0/2$	$S_3: T_0/2$	$S_3: T_b+T_0/2$	$S_3: T_a+T_b+T_0/2$	$S_3: T_a+T_b+T_0/2$	$S_3: T_a+T_0/2$

Таким образом, на основании приведенного математического аппарата можно сформировать алгоритм переключения полупроводников АИН для каждого сектора, в котором находится вектор $u_{зад}$. Для первого сектора, например, в начале периода в течение времени $T_0/2$ генерируется нулевой вектор u_0 (000), затем формируется вектор u_1 (100) в течение времени T_a , затем – вектор u_2 (110) в течение времени T_b , завершается первый полупериод нулевым вектором u_7 (111) в течение времени $T_0/2$. Второй полупериод зеркально отражает последовательность формирования базовых векторов выходного напряжения АИН. Аналогично на основании табл. 2 формируется алгоритм переключения транзисторов в остальных секторах.

Разработка модели АИН с ПВМ

Прежде чем приступить к синтезу модели собственно ПВМ, необходимо выполнить ряд вспомогательных преобразований и расчетов. Имея в качестве сигналов задания значения частоты тока статора f_s и напряжения статора $u_{зад}$, запишем выражение для определения напряжений в трехфазной системе координат abc :

$$u_{abc} = u_{зад} \cos\left(2\pi f_s t + l \frac{\pi}{3}\right), \quad (11)$$

где $l = 0$ для фазы a , $l = 2$ для фазы b , $l = 4$ для фазы c .

В электроприводе и преобразовательной технике математическое описание проводится в двухфазной системе координат (на рис. 2 векторы выходного напряжения построены в двухфазной неподвижной системе координат x, y), поэтому далее нужно преобразовать напряжения из трехфазной системы координат в двухфазную:

$$u_x = \frac{2}{3} \cdot u_a - \frac{1}{3} \cdot u_b - \frac{1}{3} \cdot u_c, \quad (12)$$

$$u_y = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u_b - \frac{1}{\sqrt{3}} u_c. \quad (13)$$

Модель преобразователя частоты с АИН с ПВМ реализована с помощью программного комплекса *Matlab* [7]. Функциональная схема модели ПВМ показана на рис. 4.

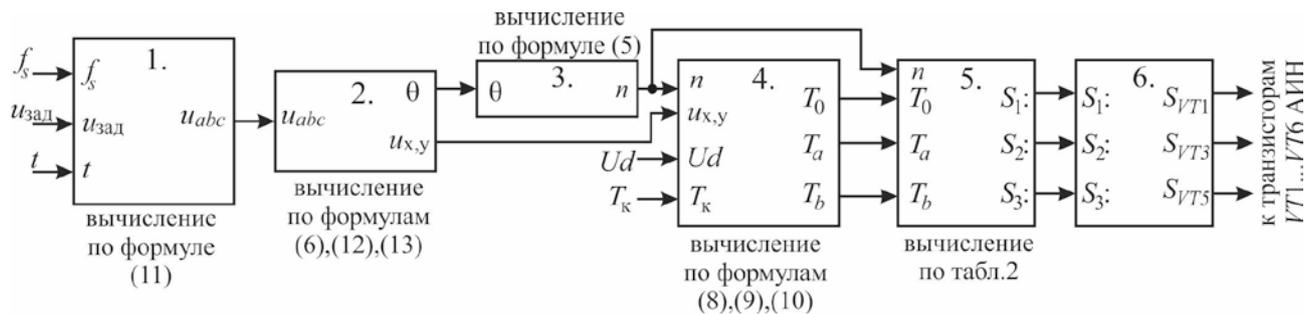


Рис. 4. Функциональная схема модели ПВМ
Fig. 4. Topology of space vector modulation model

Все использованные при моделировании ПВМ (см. рис. 4) элементы находятся в библиотеке *Simulink*. Так, в первом блоке использованы элементы *Fcn* и *Mux*; во втором блоке – *Demux*, *Gain* и *Atan2*; в третьем блоке – *Constant*, *Relational Operator*, *Logical Operator*, *Data Type Conversion*, *Sum* и *Saturation*; в четвертом блоке – *Mux*, *Fcn*, *Sum* и *Gain*; в пятом блоке – *Mux*, *Gain*, *Fcn* и *Multi-Port Switch*; в шестом блоке – *Repeating Sequence*, *Logical Operator* и *Mux*. Отметим, что шестой блок реализует принципы классического широтно-импульсного модулирования, т.е. в нем происходит сравнение полученных длительностей функций переключения с пилообразным сигналом. Трудностей при реализации этого блока не возникает, он подробно описан в разных работах, например, в работе [7].

Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты моделирования приведены на рис. 5. Нагрузкой АИН являлся асинхронный двигатель типа 4A112M4У3 мощностью 5,5 кВт (модель АД *Asynchronous Machine Si Units* находится в библиотеке *SimPowerSystems*). Система управления двигателем – скалярная с пропорциональной зависимостью между напряжением и частотой тока статора [8]. В качестве модели силовых ключей АИН были выбраны элементы *Ideal Switch*, в качестве

модели диодов выпрямителя – элементы *Diode*, в качестве модели конденсатора звена постоянного тока – элемент *Series RLC*; все элементы принадлежат библиотеке *SimPowerSystems*. Модель силового канала преобразователя частоты полностью соответствует схеме (см. рис. 1).

Качественный и количественный характер зависимости фазного u_a (см. рис. 5, а) и линейного u_{ab} (см. рис. 5, б) напряжений от времени t подтверждает адекватность разработанной модели. При исследовании зависимости КГИ тока статора от частоты коммутации (см. рис. 5, в) принимались номинальные значения напряжения и частоты тока статора ($u_{зад} = 311$ В, $f_{s,ном} = 50$ Гц), при исследовании зависимости КГИ от относительной частоты тока статора $f_* = f_s / f_{s,ном}$ принималось напряжение $u_{зад} = 311$ В и частота коммутации $f_s = 5$ кГц. На рис. 5 приняты обозначения: M – момент сопротивления АД; $M_{ном}$ – номинальное значение момента. Анализ зависимости КГИ от момента показывает, что с увеличением момента КГИ уменьшается, что можно объяснить увеличением тока статора по отношению к току холостого хода и преобладанием в гармоническом составе тока его первой гармоники. Увеличение частоты коммутации также приводит к уменьшению КГИ тока статора, что объясняется общими принципами работы широтно-импульсных модуляторов. Зависимость КГИ тока статора от его частоты показывает, что максимальное значение КГИ соответствует номинальному значению частоты; при уменьшении частоты КГИ резко возрастает, что указывает на необходимость корректного выбора мощности АД и способа его охлаждения при разработке электроприводов с регулированием частоты вращения в первой зоне.

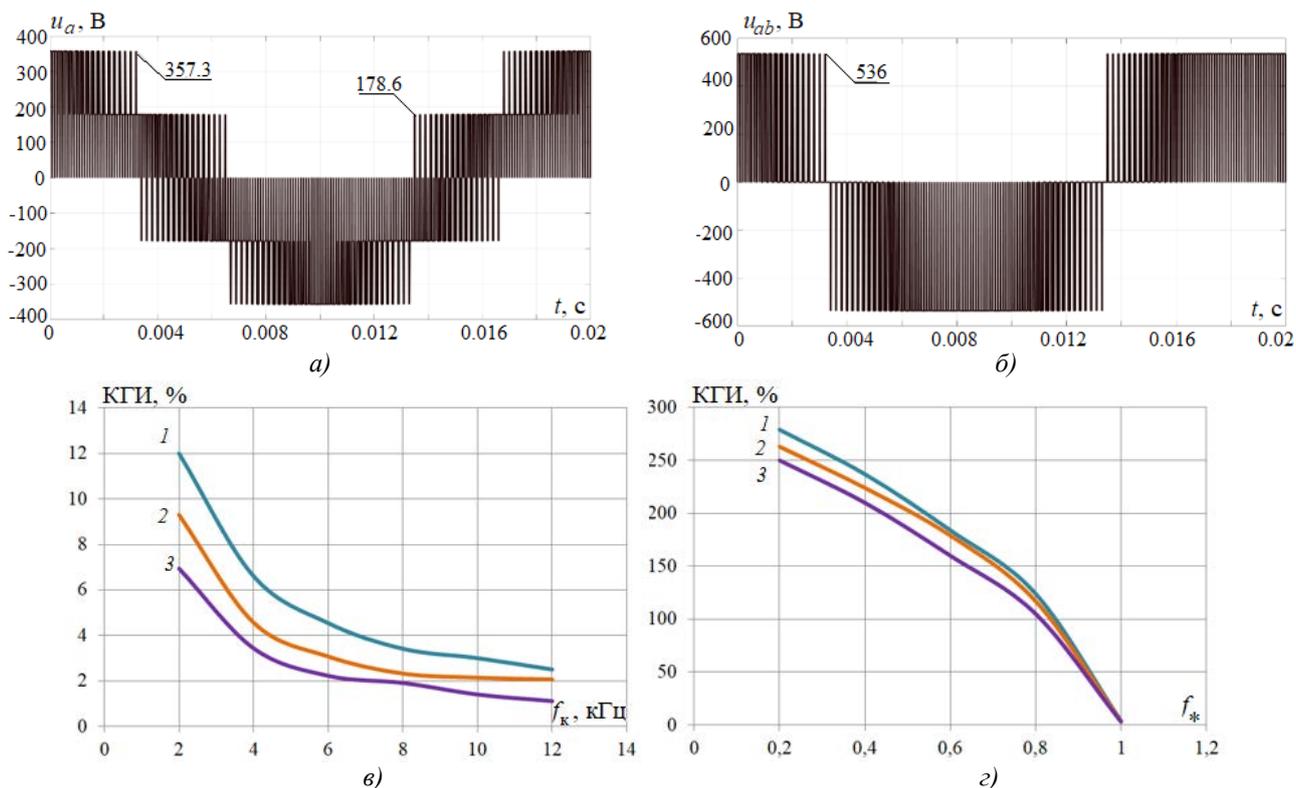


Рис. 5. Результаты моделирования АИН с ПВМ:

а – зависимость фазного напряжения от времени; б – зависимость линейного напряжения от времени; в – зависимость КГИ тока статора от частоты коммутации силовых ключей; г – зависимость КГИ тока статора от его частоты; 1 – $M = 0,3M_{ном}$; 2 – $M = 0,5M_{ном}$; 3 – $M = 0,7M_{ном}$

Fig. 5. Simulation results of voltage source inverter with space-vector modulation:

а – phase voltage vs. time; б – line to line voltage vs. time; в – THD of stator current vs. frequency switching; г – THD of stator current vs. its frequency

Результаты моделирования механических характеристик электропривода также

подтвердили адекватность разработанной модели.

Заключение

В статье предложено математическое описание ПВМ, предназначенной для формирования выходного напряжения АИН преобразователя частоты со звеном постоянного тока, в качестве нагрузки которого выбран асинхронный двигатель мощностью 5,5 кВт. Реализация синтезированных функциональных и табличных зависимостей выполнена с помощью элементов библиотеки *Simulink* программного комплекса *Matlab*, реализация модели силового канала электропривода выполнена с помощью элементов библиотеки *SimPowerSystems*. В результате моделирования установлена адекватность разработанной модели, выявлен качественный характер зависимости КГИ тока статора от момента АД, частоты тока статора и частоты коммутации силовых ключей АИН.

Список источников:

1. **Roomi, M.M.** An overview of carrier-based modulation methods for Z-source inverter / M.M. Roomy // *Power Electronics and Drives*, 2019, Vol. 4(39). – DOI: 10.2478/pead-2019-0007
2. **Quan, H.** Study of a novel over-modulation technique based on space-vector PWM / H. Quan, Z. Gang, C. Jie, Z. Wu, and Z. Liu // *IEEE Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, 2011, pp. 295-298. – DOI: 10.1109/CDCIEM.2011.187
3. **Leedy, A.W.** Harmonic analysis of a space vector PWM inverter using the method of multiple pulses / A.W. Leedy, R.M. Nelms // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, July 2006, Vol. 4, pp. 1182-1187. – DOI: 10.1109/ISIE.2006.295805
4. **Zhou, K.** Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis [three-phase inverters] / K. Zhou and D. Wang // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, February 2002, Vol. 49, No. 1, pp. 186-196. – DOI: 10.1109/41.982262
5. **Kumar, K.V.** Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter / K.V. Kumar, P.A. Michael, J.P. John and S.S. Kumar // *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, July 2010, Vol. 5, No. 7, pp. 61-74.
6. **Sabarad, J.** Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter / J. Sabarad, G.H. Kulkarni // *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*. – DOI: 10.1109/ICPACE.2015.7274949
7. **Krishnan, V.** *Electric Motor Drives: modeling, analysis and control* / V. Krishnan // Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2001.
8. **Kosmodamianskii, A.S.** Scalar control systems for a traction induction motor / A.S. Kosmodamianskii, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev // *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, No. 9, pp. 518-524. – DOI: 10.3103/S1068371216090078

References:

1. Roomi, M.M. An overview of carrier-based modulation methods for Z-source inverter / M.M. Roomy // *Power Electronics and Drives*, 2019, Vol. 4(39). – DOI: 10.2478/pead-2019-0007
2. Quan, H. Study of a novel over-modulation technique based on space-vector PWM / H. Quan, Z. Gang, C. Jie, Z. Wu, and Z. Liu // *IEEE Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, 2011, pp. 295-298. – DOI: 10.1109/CDCIEM.2011.187
3. Leedy, A.W. Harmonic analysis of a space vector PWM inverter using the method of multiple pulses / A.W. Leedy, R.M. Nelms // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, July 2006, Vol. 4, pp. 1182-1187. – DOI: 10.1109/ISIE.2006.295805
4. Zhou, K. Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis [three-phase inverters] / K. Zhou and D. Wang // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, February 2002, Vol. 49, No. 1, pp. 186-196. – DOI: 10.1109/41.982262
5. Kumar, K.V. Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter / K.V. Kumar, P.A. Michael, J.P. John and S.S. Kumar // *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, July 2010, Vol. 5, No. 7, pp. 61-74.
6. Sabarad, J. Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter / J. Sabarad, G.H. Kulkarni // *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*. – DOI: 10.1109/ICPACE.2015.7274949
7. Krishnan, V. *Electric Motor Drives: modeling, analysis and control* / V. Krishnan // Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2001.
8. Kosmodamianskii, A.S. Scalar control systems for a traction induction motor / A.S. Kosmodamianskii, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev // *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, No. 9, pp. 518-524. – DOI: 10.3103/S1068371216090078

Информация об авторах

Николай Валентинович Чуприна

тел. +7-4832-58-82-32, аспирант, ассистент кафедры «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета

Сергей Владимирович Седых

тел. +7-4832-58-82-32, аспирант, ассистент кафедры «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета

Александр Анатольевич Пугачев

доцент, доктор технических наук, тел. +7-4832-58-82-32, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета

Владимир Петрович Маклаков

доцент, кандидат технических наук, тел. +7-4832-58-82-32, доцент кафедры «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета

Information about authors:

Nikolay Valentinovich Chuprina

tel. +7-4832-58-82-32, Postgraduate Student, Assistant of the Department of Industrial Electronics and Electrical Engineering of Bryansk State Technical University

Sergey Vladimirovich Sedykh

tel. +7-4832-58-82-32, Postgraduate Student, Assistant of the Department of Industrial Electronics and Electrical Engineering of Bryansk State Technical University

Alexander Anatolyevich Pugachev

tel. +7-4832-58-82-32, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Industrial Electronics and Electrical Engineering of Bryansk State Technical University

Vladimir Petrovich Maklakov

tel. +7-4832-58-82-32, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Industrial Electronics and Electrical Engineering of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; одобрена после рецензирования 16.02.2022; принята к публикации 18.02.2022.

The article was submitted 08.02.2021; approved after reviewing 16.02.2022; accepted for publication 18.02.2022.

Рецензент – Космодамианский А.С., доктор технических наук, профессор, Российский университет транспорта.

Reviewer – Kosmodamiansky A.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian University of Transport.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Редактор Д.А. Петраченко.

Сдано в набор 16.03.2022. Выход в свет 30.03.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10.23.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+