

УДК 621.341.572

Оценка динамических потерь в силовых ключах автономных инверторов при различных алгоритмах модуляции

А. В. Машкин, С. Б. Федотовский*

*Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия;
e-mail: fsb1960@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4906-2125>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
11.09.2020;

Получена
после доработки
04.12.2020

Ключевые слова:

автономный
инвертор,
динамические потери,
асинхронный
двигатель,
высокоскоростной
электропривод,
энергосбережение

Для цитирования

При проектировании автоматизированного электропривода требуется обеспечить необходимые показатели качества регулирования скорости с наименьшими потерями энергии в нем. Оценка динамических потерь в силовых полупроводниковых ключах автономных инверторов напряжения (АИН) обусловлена необходимостью выбора оптимальных алгоритмов управления ими с целью повышения энергоэффективности в системах частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Для решения поставленных задач применялся метод математического моделирования. С помощью разработанной программы произведена оценка динамических потерь в высокоскоростном электроприводе в ходе его работы в установившемся режиме. При типичной частоте модуляции $f_m = 6000$ Гц, обеспечивающей при скалярных алгоритмах управления достаточную степень аппроксимации формируемых огибающих фазных напряжений к синусоидальной форме, и применении алгоритмов широтно-импульсного регулирования (ШИР) наблюдались значительные динамические потери в ключах автономного инвертора напряжения. В ходе использования алгоритмов ШИР не требуется точной аппроксимации синусоидальной формы, что дает возможность сократить частоту модуляции и, как следствие, уменьшить величину динамических потерь в ключах АИН. Поэтому сравнительная оценка динамических потерь проводилась для схемы классического трехфазного АИН при использовании алгоритмов однополярного и двухполярного широтно-импульсного регулирования. Полученные результаты моделирования показали, что алгоритм однополярного ШИР является более энергосберегающим по сравнению с алгоритмом двухполярного ШИР при использовании в высокоскоростных электроприводах.

Машкин А. В. и др. Оценка динамических потерь в силовых ключах автономных инверторов при различных алгоритмах модуляции. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 4. С. 326–334. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-326-334

Assesment of dynamic losses in power switches of autonomous inverters with different modulation algorithms

Andrey V. Mashkin, Sergey B. Fedotovskiy*

*Vologda State University, Vologda, Russia;
e-mail: fsb1960@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4906-2125>

Article info

Received
11.09.2020;

received
in revised 04.12.2020

Key words:

autonomous inverter,
dynamic losses,
asynchronous motor,
high speed electric drive,
energy saving

Abstract

When designing an automated electric drive, it is required to provide the necessary quality indicators of speed control as much as possible with the lowest energy losses in it. Assessment of dynamic losses in power semiconductor switches of autonomous voltage inverters (AVI) is due to the need to select optimal control algorithms for them in order to increase energy efficiency in frequency-controlled asynchronous electric drive systems. To solve the set tasks, the method of mathematical modeling has been used. With the help of the developed program, an assessment of the dynamic losses in a high-speed electric drive during its operation in a steady state has been made. At a typical modulation frequency $f_m = 6,000$ Hz, which with scalar control algorithms provides a sufficient degree of approximation of the generated phase voltage envelopes to a sinusoidal form, and the use of pulse-width control (WIR) algorithms, significant dynamic losses are observed in the switches of an autonomous voltage inverter. In the course of using the WID algorithms, an accurate approximation of the sinusoidal shape is not required, which makes it possible to reduce the modulation frequency and, as a consequence, reduce the amount of dynamic losses in the AVI keys. Therefore, a comparative assessment of dynamic losses has been carried out for the scheme of a classic three-phased AVI using the algorithms of unipolar and bipolar pulse-width control. The obtained simulation results have shown that the unipolar WID algorithm is more energy-saving compared to the bipolar WID algorithm when used in high-speed electric drives.

For citation

Mashkin, A. V. et al. 2020. Assesment of dynamic losses in power switches of autonomous inverters with different modulation algorithms. *Vestnik of MSTU*, 23(4), pp. 326–334. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-326-334

Введение

Регулирование скорости асинхронного двигателя (АД) в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах (ЭП) осуществляется с использованием различных схем преобразователей частоты (ПЧ) (Асанов и др., 2002; Сидоров, 2009; Hota et al., 2017) и алгоритмов управления его силовыми ключами (Васильев и др., 2014; 2020; Andreev et al., 2018). При этом для значительного класса ЭП актуальна проблема энергосбережения (Andreev et al., 2017; Vodovozov et al., 2019). Основным фактором, влияющим на выбор того или иного алгоритма управления с целью уменьшения энергопотребления, – величина динамических потерь в силовых полупроводниковых ключах ПЧ.

Целью настоящего исследования является определение алгоритма модуляции, обеспечивающего минимизацию динамических потерь в силовых полупроводниковых ключах ПЧ при скалярных алгоритмах управления.

Материалы и методы

В процессе исследования применялся метод математического моделирования системы АИН – АД (автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель) в высокоскоростных ЭП с целью оценки величины потерь энергии при коммутации силовых полупроводниковых ключей ПЧ (динамических потерь). Для решения поставленных задач использовалось представление АД в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений. Коэффициенты в дифференциальных уравнениях, входящих в данную систему, определялись параметрами асинхронного двигателя 4A225M2У3, выбранного в качестве объекта исследования, совместно с силовыми полупроводниковыми ключами IGBT IXGK120N120B3. Оценка величины динамических потерь проводилась для скалярных (модульных) алгоритмов управления асинхронного электропривода.

Приближенно энергию потерь на включение и выключение ключа можно определить исходя из стилизованной формы импульса прямого тока, изображенной на рис. 1 (Воронин, 2005), где представлены следующие обозначения: I_m – амплитуда прямого тока, протекающего через ключ; $t_p = t_3 - t_2$ – длительность прямого тока; $t_R = t_2 - t_1$ – время нарастания прямого тока (время включения); $t_F = t_4 - t_3$ – время спада прямого тока (время выключения).

Энергия потерь на включение, Дж, полностью управляемого силового полупроводникового ключа вычисляется по формуле

$$E_{ON} = \int_{t_1}^{t_2} i(t)u(t)dt, \quad (1)$$

где $i(t)$ – мгновенное значение тока; $u(t)$ – мгновенное значение напряжения.

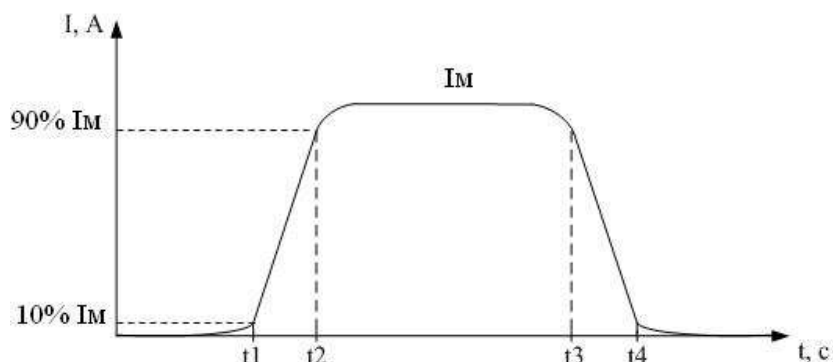


Рис. 1. Стилизованная форма импульса прямого тока

Fig. 1. Stylized forward current impulse shape

Энергия потерь на выключение, Дж, полностью управляемого силового полупроводникового ключа определяется так:

$$E_{OFF} = \int_{t_3}^{t_4} i(t)u(t)dt. \quad (2)$$

В асинхронном частотно-регулируемом ЭП в фазах нагрузки обеспечивается режим непрерывного тока, поэтому для упрощения нахождения интегралов (1) и (2) используются типовые кривые тока и напряжения при включении и выключении ключа (рис. 2) (Воронин, 2005).

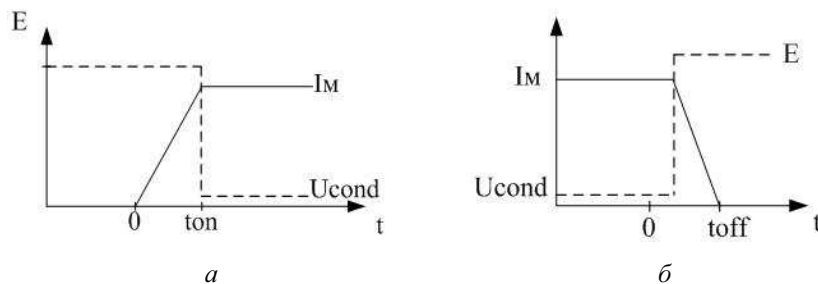


Рис. 2. Типовые кривые переходного процесса в режиме непрерывных токов: а – включения; б – выключения
 Fig. 2. Typical curves of the transient process in continuous current mode: a – switching on; б – switching off

В этом случае потери энергии при включении вычисляются по следующей формуле:

$$E_{ON} = \frac{I_M E t_R}{2},$$

где E – напряжение, прикладываемое к закрытому ключу, В.

Потери энергии на выключение будут определяться как

$$E_{OFF} = \frac{I_M E t_F}{2}.$$

Мощность динамических потерь на периоде формируемого напряжения для одной фазы находится таким образом:

$$P_{df} = \frac{1}{T_s} \sum_{i=1}^N (E_{ON} + E_{OFF}),$$

где T_s – период формируемого напряжения, с; N – количество интервалов модуляции на периоде формируемого напряжения.

Результаты и обсуждение

При определении величины динамических потерь необходимо учитывать величины фронтов включения и выключения; мгновенные значения тока, протекающего через ключ в течение периода модуляции, и напряжения, под действие которого попадает ключ в закрытом состоянии. Для упрощения анализа примем допущение о неизменности значения тока, протекающего через полупроводниковый ключ на периоде модуляции. Оценку величины динамических потерь выполним для квазиустановившегося режима работы ЭП с номинальным моментом сопротивления на валу АД с использованием классической схемы трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН) (рис. 3), которая также называется схемой одноуровневого АИН (Асанов и др., 2002; Машкин и др., 2018).

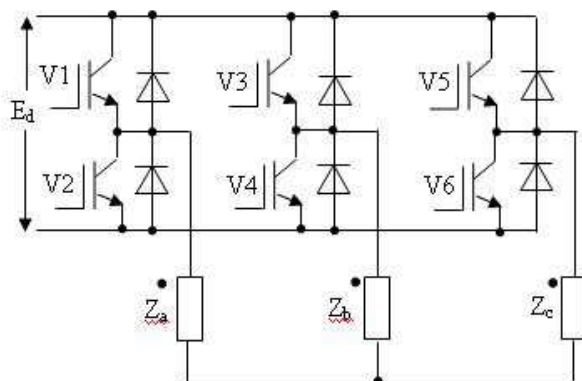


Рис. 3. Схема классического трехфазного АИН
 Fig. 3. Scheme of a classic three-phase AVI

При помощи данной схемы ПЧ возможна реализация как векторных (Александров и др., 2019; Виноградов, 2008; Плотников и др., 2016), так и скалярных (модульных) алгоритмов управления (Шонин и др., 2016; Habbi et al., 2016; Zhang et al., 2019). При реализации векторных и скалярных алгоритмов управления обычно формируются синусоидальные огибающие напряжений на фазах АД или кривые, в спектре которых допускается присутствие высших гармонических составляющих с незначительной амплитудой. Например, в случае использования скалярных алгоритмов управления могут использоваться такие виды модуляции, как двухполярная сплошная синусоидальная модуляция (ДССМ), двухполярная синусоидальная модуляция (ДСМ) на крайних интервалах, симплексная синусоидальная модуляция (ССМ), симплексная линейная модуляция (СЛМ) (Грузов и др., 2000; 2001).

В высокоскоростных электроприводах и ЭП, где не требуется значительное регулирование скорости вниз, могут использоваться алгоритмы широтно-импульсного регулирования (ШИР), например, двухполярная прямоугольная модуляция (двухполярное ШИР) и однополярная прямоугольная модуляция (однополярное ШИР) (Программа расчета спектрального состава..., 2019). Диаграмма управляющих импульсов двухполярной прямоугольной модуляции представлена на рис. 4, однополярной прямоугольной модуляции – на рис. 5 (Mashkin et al., 2020).

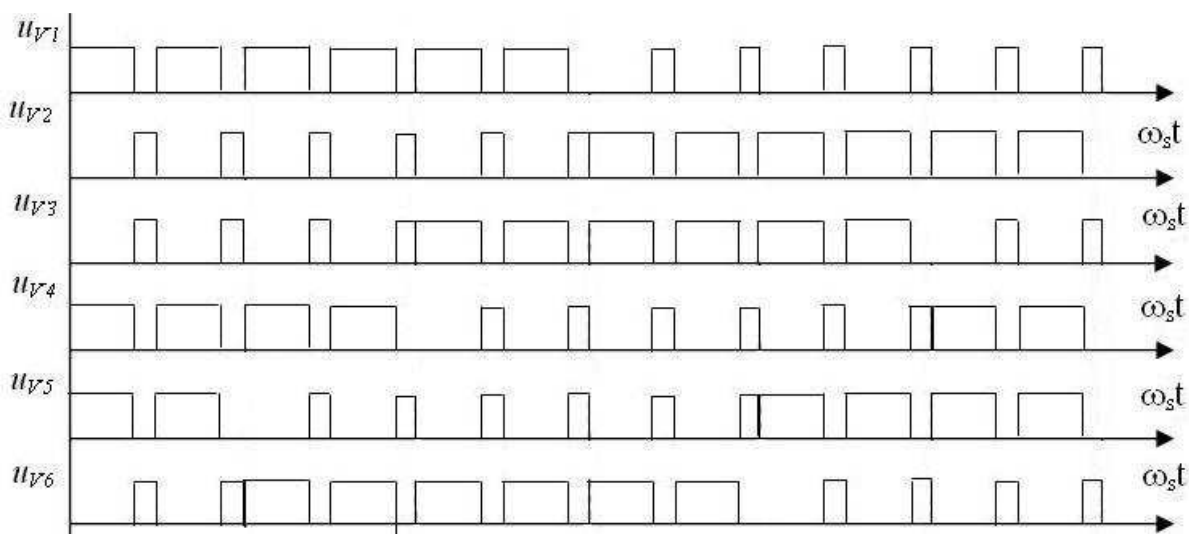


Рис. 4. Диаграмма управляющих импульсов при двухполярном ШИР
 Fig. 4. Control pulse diagram for bipolar PWM

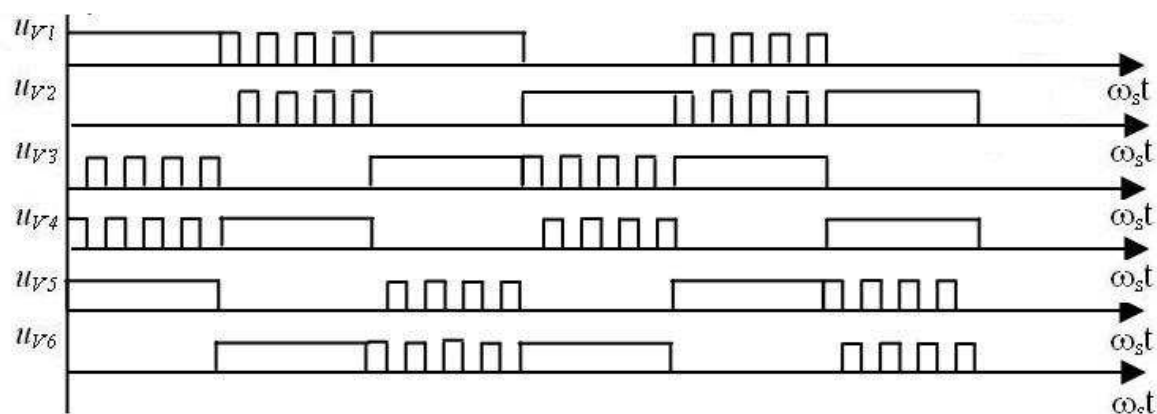


Рис. 5. Диаграмма управляющих импульсов при однополярном ШИР
 Fig. 5. Control pulse diagram for unipolar PWM

Алгоритмы ШИР используются для управления ЭП, обеспечивающими приведение в движение механизмов, имеющих вентиляторную характеристику. Упрощенно (при пренебрежении трением) вентиляторная характеристика механизма описывается следующим уравнением:

$$M_c(\omega) = M_H \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2,$$

где M_n – номинальный момент двигателя, Н·м; ω_n – номинальная скорость вращения вала двигателя.

Для оценки динамических потерь в ключах АИН при установившемся режиме работы можно воспользоваться Т-образной схемой замещения фазы АД. Формируемую кривую ступенчатого напряжения на фазе статора АД раскладывают в ряд Фурье, по известным параметрам схемы замещения получают амплитуды гармонических составляющих тока, а также фазовые сдвиги между гармониками токов и напряжений (Машкин и др., 2018), и далее, просуммировав динамические потери в силовых ключах от каждой гармоники тока, находят общие динамические потери. Однако в этом случае более целесообразно решить нелинейную систему дифференциальных уравнений, представляющих математическую модель АД (Mashkin et al., 2020):

$$\begin{cases} U_{sa} = r_s i_{sa} + L_s \frac{di_{sa}}{dt} + L_\mu \frac{di_{ra}}{dt}, \\ U_{sb} = r_s i_{sb} + L_s \frac{di_{sb}}{dt} + L_\mu \frac{di_{rb}}{dt}, \\ U_{sc} = r_s i_{sc} + L_s \frac{di_{sc}}{dt} + L_\mu \frac{di_{rc}}{dt}, \\ 0 = r_r i_{ra} + L_r \frac{di_{ra}}{dt} + L_\mu \frac{di_{sa}}{dt} - \frac{1}{\sqrt{3}} (L_r (i_{rb} - i_{rc}) + L_\mu (i_{sb} - i_{sc})) \omega p_n, \\ 0 = r_r i_{rb} + L_r \frac{di_{rb}}{dt} + L_\mu \frac{di_{sb}}{dt} - \frac{1}{\sqrt{3}} (L_r (i_{rc} - i_{ra}) + L_\mu (i_{sc} - i_{sa})) \omega p_n, \\ 0 = r_r i_{rc} + L_r \frac{di_{rc}}{dt} + L_\mu \frac{di_{sc}}{dt} - \frac{1}{\sqrt{3}} (L_r (i_{ra} - i_{rb}) + L_\mu (i_{sa} - i_{sb})) \omega p_n, \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \end{cases}$$

где i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} – токи фаз a, b, c статора асинхронного двигателя, А; i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} – токи эквивалентных фаз a, b, c ротора, А; ω – скорость вращения ротора, рад/с; L_μ, L_s, L_r – индуктивности намагничивающего контура, полного контура статора, полного контура ротора, Гн; U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} – напряжения, подаваемые на статор асинхронного двигателя, В.

Для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений с учетом специфики моделируемого объекта управления (ЭП) можно воспользоваться алгоритмом, приведенным в работе (Mashkin et al., 2019).

В качестве нагрузки, на которую работает ПЧ, выберем АД 4A225M2Y3 с номинальной мощностью $P_n = 55$ кВт, основные параметры которого (Кравчик и др., 1982) приведены в табл. 1. Параметры его Т-образной схемы замещения указаны в табл. 2, где использованы обозначения: r_s – активное сопротивление фазы статора; r_r – активное сопротивление фазы ротора; x_μ – индуктивное сопротивление намагничивающего контура; x_s – индуктивное сопротивление фазы статора; x_r – индуктивное сопротивление фазы ротора.

Таблица 1. Параметры АД 4A225M2Y3
Table 1. AM 4A225M2Y3 parameters

P_n , кВт	M_n , Н·м	$I_{нн}$, А	КПД, %	$\cos \varphi$
55	178,28	99,54	91	0,92

Таблица 2. Параметры Т-образной схемы замещения АД 4A225M2Y3
Table 2. Parameters of the T-shaped equivalent circuit AM 4A225M2Y3

r_{s2} , Ом	r_{r2} , Ом	$x_{\mu2}$, Ом	x_{s2} , Ом	x_{r2} , Ом
0,057	0,041	12,38	12,58	12,63

Для проведения оценки динамических потерь при выбранных алгоритмах прямоугольной модуляции используем в качестве силовых полупроводниковых ключей IGBT IXGK120N120B3, основные параметры которого приведены в табл. 3, где указаны следующие обозначения: $U_{кэ}$ – предельно допустимое напряжение коллектор-эмиттер; $U_{нас.кэ}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер; I_K – максимальный постоянный ток коллектора; $t_{вкл}$ – время включения; $t_{выкл}$ – время выключения.

Таблица 3. Основные параметры IGBT IXGK120N120B3
Table 3. Basic parameters of IGBT IXGK120N120B3

$U_{кэ}$, В	$U_{нас.кэ}$, В	I_K , А	$t_{вкл}$, нс	$t_{выкл}$, нс
1 200	3	200	124	420

При работе АД, обеспечивающего приведение в движение механизма, обладающего вентиляторной механической характеристикой, момент сопротивления на валу двигателя будет падать вместе со снижением скорости; в этом случае достаточно выбрать простейший алгоритм скалярного управления – пропорциональное управление, при котором обеспечивается выполнение условия

$$U_s / f_s = \text{const},$$

где U_s – действующее значение напряжения статора, В; f_s – частота формируемого на статоре напряжения, Гц.

Механическая характеристика асинхронного двигателя в общем виде при скалярных (модульных) законах управления в частотно-регулируемом ЭП определяется следующим уравнением (Mashkin et al., 2018):

$$M = \frac{m_s p_n}{2\pi f_{\text{SH}}} \left(\frac{u_x^*}{f_s^*} \right)^2 \frac{r_r}{f_r^*} \frac{x_\mu^2 U_{\text{SH}}^2}{F^2(f_s^*, f_r^*)}, \quad (3)$$

где m_s – число фаз обмотки статора; $F(f_s^*, f_r^*) = \sqrt{\left(\frac{r_s r_r}{f_s^* f_r^*} - x_r x_s \sigma \right)^2 + \left(\frac{r_r}{f_r^*} x_s + \frac{r_s}{f_s^*} x_r \right)^2}$; $\sigma = 1 - \frac{x_\mu}{x_s x_x}$ –

коэффициент рассеяния машины; $f_s^* = \frac{f_s}{f_{\text{SH}}}$ – относительная частота тока статора; $f_r^* = s f_s^*$ – относительная

частота тока ротора; $u_s^* = \frac{U_s}{U_{\text{SH}}}$ – относительное напряжение фазы статора АД; p_n – число пар полюсов АД;

f_{SH} – номинальная частота напряжения, подводимого к фазе статора АД, Гц; U_{SH} – действующее значение номинального напряжения, подводимое к фазе статора АД.

Отношение u_s^* / f_s^* в формуле (3) определяет используемый закон скалярного управления. Для пропорционального закона управления это отношение численно равно единице. На рис. 6 приведены механические характеристики асинхронного двигателя 4A225M2U3 при пропорциональном законе управления и частотах формируемого на статоре напряжения $f_s = 50; 37,5; 25; 12,5$ Гц, а также механическая характеристика механизма, имеющего вентиляторную характеристику.

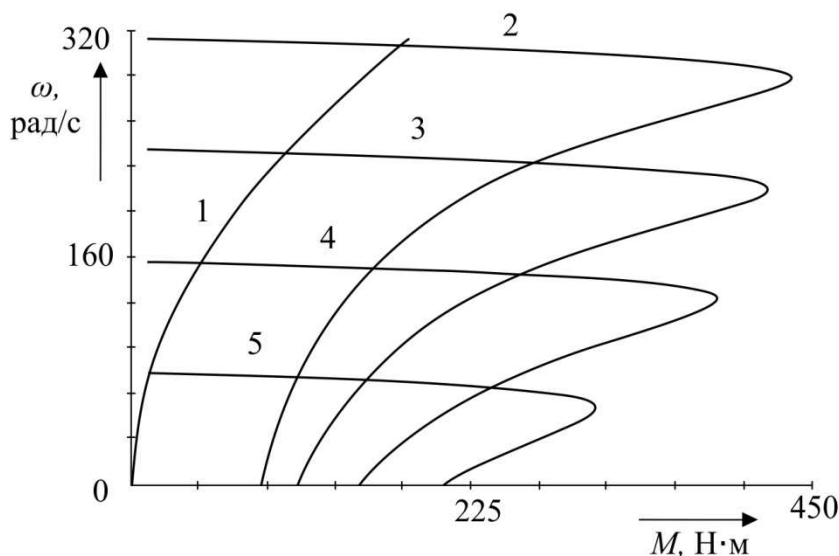


Рис. 6. Механические характеристики нагрузки (1) и АД 4A225M2U3 при $f_s = 50$ Гц (2), $f_s = 37,5$ Гц (3), $f_s = 25$ Гц (4), $f_s = 12,5$ Гц (5)

Fig. 6. Mechanical characteristics of load (1) and AD 4A225M2U3 at $f_s = 50$ Hz (2), $f_s = 37.5$ Hz (3), $f_s = 25$ Hz (4), $f_s = 12.5$ Hz (5)

Оценка динамических потерь для одной фазы при различных частотах модуляции на рабочих точках механической характеристики отражена в табл. 4.

Таблица 4. Динамические потери в ключах АИН при работе на АД 4А225М2У3
Table 4. Dynamic losses in the AVI keys when operating on AM 4A225M2U3

f_s , Гц	M_c , Н·м	f_m , Гц	$P_{дин}$, Вт	
			Двухполярное ШИР	Однополярное ШИР
50	178	6 000	140,2	60,4
		500	7,3	1,2
37,5	100	6 000	83,2	32,8
		500	4,2	1,2
25	45	6 000	51,2	17,6
		500	5,7	2,1
12,5	11	6 000	42,1	12,8
		500	9,3	2,1

Заключение

На основе проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

1) при типичной частоте модуляции $f_m = 6000$ Гц и применении скалярных алгоритмов управления обеспечивается достаточная степень аппроксимации формируемых огибающих фазных напряжений к синусоидальной форме, при использовании алгоритмов ШИР наблюдаются значительные динамические потери в ключах АИН;

2) в ходе применения алгоритмов ШИР не требуется точной аппроксимации синусоидальной формы, в результате чего появляется возможность сокращения частоты модуляции и, как следствие, уменьшения величины динамических потерь в ключах АИН;

3) алгоритм однополярной прямоугольной модуляции (однополярное ШИР) при любых режимах нагрузки и значениях частоты модуляции обеспечивает меньшие динамические потери в ключах АИН по сравнению с алгоритмом двухполярной прямоугольной модуляции (двухполярное ШИР).

Библиографический список

- Александров Е. В., Чудаков Д. Д., Кочановская А. И., Голинский А. А. Релейные системы разрывного векторного управления асинхронным электроприводом вооружения зенитного комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 4. С. 390–402.
- Асанов А. З., Романовский Э. А. Многоуровневые трехфазные автономные инверторы напряжений // Электричество. 2002. № 12. С. 42–51.
- Васильев Б. Ю., Добуш В. С. Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями // Электричество. 2014. № 4. С. 54–61.
- Васильев Б. Ю., Шелудченко Е. С. Система управления с переменной частотой модуляции автономного инвертора преобразователя частоты // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63, № 1. С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2020-1-43-48>.
- Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново : Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2008. 298 с.
- Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М. : Додэка-XXI, 2005. 384 с.
- Грузов В. Л., Красильников А. Н., Машкин А. В. Анализ и оптимизация алгоритмов управления в частотно-регулируемых электроприводах с инверторами напряжения // Электротехника. 2000. № 4. С. 15–20.
- Грузов В. Л., Машкин А. В. Сравнительный анализ алгоритмов управления автономными инверторами напряжения в асинхронных электроприводах // Электротехника. 2001. № 12. С. 34–40.
- Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М. : Энергоатомиздат, 1982. 504 с.
- Машкин А. В., Зайцев А. А. Анализ спектрального состава различных типов преобразователей частоты при синусоидальных алгоритмах модуляции // Информационные технологии моделирования и управления. 2018. Т. 110, № 2. С. 117–125.
- Плотников Ю. В., Виноградов С. А., Кочкина А. М. О методике настройки векторных систем автоматического управления для серийных преобразователей частоты // Труды I науч.-техн. конф. молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. Екатеринбург : УрФУ, 2016. С. 171–174.
- Программа расчета спектрального состава выходного напряжения одноуровневого автономного инвертора при скалярных алгоритмах управления его ключами : св-во о гос. рег. программ для ЭВМ № 2019617041 Рос. Федерация / Машкин А. В., Федотовский С. Б. № 2019616093; заявл. 27.05.2019; опубл. 03.06.2019.

- Сидоров С. Матричный преобразователь частоты – объект скалярного управления // Силовая электроника. 2009. № 21. С. 31–35.
- Шонин А. Б., Новожилов Н. Г., Крыльцов С. Б. Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 11–2. С. 507–520.
- Andreev A. N., Kolesnichenko D. A. Increasing the energy efficiency of the cyclic action mechanisms in rolling for a roller bed used as an example // Russian Metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017, Iss. 12. P. 1025–1032. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029517120035>.
- Andreev A. N., Kolesnichenko D. A., Kolesnichenko N. M. Measuring and primary processing of signals of a sensor of magnetic induction in the working zone of an electromechanical system // Measurement Techniques. 2018. Vol. 61, Iss. 8. P. 812–816. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1507-1>.
- Habbi H. M. D., Ajeel H. J., Ali I. I. Speed control of induction motor using PI and V/F scalar vector controllers // International Journal of Computer Applications. 2016. Vol. 151, Iss. 7. P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2016911831>.
- Hota A., Jain S., Agarwal V. An optimized three-phase multilevel inverter topology with separate level and phase sequence generation part // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32, Iss. 10. P. 7414–7418. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2688394>.
- Mashkin A. V., Zaytsev A. A. Comparative analysis energy efficiency of frequency converters using spectral models // Modern Informatization Problems in the Technological and Telecommunication Systems Analysis and Synthesis / Proceedings of the XXIII-th Intern. Open Science Conference. Yelm, WA, USA, 04–06 January, 2018. Yelm : Science Book Publishing House LLC, 2018. P. 239–244.
- Mashkin A., Fedotovskiy S., Gunina M. G., Solovov Ya. Ya. [et al.]. Method of modeling electric drives with digital control systems // E3S Web of Conferences: Intern. Scientific and Technical Conf. Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), 18–20 September, 2019, Kazan, Russia, 2019. Vol. 124. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402021>.
- Mashkin A. V., Fedotovskiy S. B. Modeling of asynchronous high frequency electric drives // Modern Informatization Problems in Simulation and Social Technologies (MIP2020'SCT) : Proc. of the XXV-th Intern. Open Science Conf. Yelm, WA, USA, 10 January, 2020. Yelm : Science Book Publishing House LLC. 2020. P. 148–154.
- Vodovozov A., Chernyaeva N., Zaripova D. A., Zhakishv B. A. [et al.]. Energy model of electric drive of centrifugal borehole pump // E3S Web of Conferences: Intern. Scientific and Technical Conf. Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), 18–20 September, 2019, Kazan, Russia, 2019. Vol. 124. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402018>.
- Zhang Z., Bazzi A. M. Robust sensorless scalar control of induction motor drives with torque capability enhancement at low speeds // IEEE Intern. Conf. on Electric Machines and Drives (IEMDC), May 12–15, 2019, Westin San Diego, San Diego, CA. The Printing House, Inc, 2020 P. 1706–1710. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785159>.

References

- Alexandrov, E. V., Chudakov, D. D., Kochanovskaya, A. I., Golinsky, A. A. 2019. Relay systems of discontinuous vector control of the asynchronous electric drive of the anti-aircraft complex weapons. *Izvestiya Tula State University. Technical science*, 4, pp. 390–402. (In Russ.)
- Asanov, A. Z., Romanovsky, E. A. 2002. Multi-level three-phase autonomous voltage inverters. *Elektrichestvo*, 12, pp. 42–51. (In Russ.)
- Vasiliev, B. Yu., Dobush, V. S. 2014. Effective control algorithms for semiconductor converters. *Elektrichestvo*, 4, pp. 54–61. (In Russ.)
- Vasiliev, B. Yu., Sheludchenko, E. S. 2020. Control system with variable modulation frequency of an autonomous inverter of a frequency converter. *Russian Electromechanics*, 63(1), pp. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2020-1-43-48>. (In Russ.)
- Vinogradov, A. B. 2008. Vector control of alternating current electric drives. Ivanovo. (In Russ.)
- Voronin, P. A. 2005. Power semiconductor switches: families, characteristics, applications. Moscow. (In Russ.)
- Gruzov, V. L., Krasilnikov, A. N., Mashkin, A. V. 2000. Analysis and optimization of control algorithms in variable frequency drives with voltage inverters. *Russian Electrical Engineering*, 4, pp. 15–20. (In Russ.)
- Gruzov, V. L., Mashkin, A. V. 2001. Comparative analysis of control algorithms for autonomous voltage inverters in asynchronous electric drives. *Russian Electrical Engineering*, 12, pp. 34–40. (In Russ.)
- Kravchik, A. E., Shlaf, M. M., Afonin, V. I., Sobolenskaya, E. A. 1982. Asynchronous motors series 4A: Handbook. Moscow. (In Russ.)
- Mashkin, A. V., Zaitsev, A. A. 2018. Analysis of the spectral composition of various types of frequency converters with sinusoidal modulation algorithms. *Informatsionnyye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya*, 110(2), pp. 117–125. (In Russ.)

- Plotnikov, Yu. V., Vinogradov, S. A., Kochkina, A. M. 2016. On the method of tuning vector automatic control systems for serial frequency converters. In coll. articles I scientific conf. of young scientists of Ural Power Engineering Institute. 16–20 May, 2016. Ekaterinburg, pp. 171–174. (In Russ.)
- The program for calculating the spectral composition of the output voltage of a single-level autonomous inverter with scalar algorithms for controlling its keys. 2019. St. of state reg. for computer prog. 2019617041 Rus. Federation / No. 2019616093. Mashkin, A. V., Fedotovskiy, S. B. (In Russ.)
- Sidorov, S. 2009. Matrix frequency converter – scalar control object. *Power Electronics*, 21, pp. 31–35. (In Russ.)
- Shonin, A. B., Novozhilov, N. G., Kryltsov, S. B. 2016. Increasing the stability of an asynchronous electric drive with a sensorless scalar control system in case of network voltage dips. *Izvestiya Tula State University. Technical science*, 11–2, pp. 507–520. (In Russ.)
- Andreev, A. N., Kolesnichenko, D. A. 2017. Increasing the energy efficiency of the cyclic action mechanisms in rolling for a roller bed used as an example. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2017(12), pp. 1025–1032. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029517120035>.
- Andreev, A. N., Kolesnichenko, D. A., Kolesnichenko, N. M. 2018. Measuring and primary processing of signals of a sensor of magnetic induction in the working zone of an electromechanical system. *Measurement Techniques*, 61(8), pp. 812–816. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1507-1>.
- Habbi, H. M. D., Ajeel, H. J., Ali, I. I. 2016. Speed control of induction motor using PI and V/F scalar vector controllers. *International Journal of Computer Applications*, 151(7), pp. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2016911831>.
- Hota, A., Jain, S., Agarwal, V. 2017. An optimized three-phase multilevel inverter topology with separate level and phase sequence generation part. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(10), pp. 7414–7418. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2688394>.
- Mashkin, A. V., Zaytsev, A. A. 2018. Comparative analysis energy efficiency of frequency converters using spectral models. Proceedings of the XXIII-th Intern. Open Science Conf. *Modern Informatization Problems in the Technological and Telecommunication Systems Analysis and Synthesis*, Yelm, WA, USA, 04–06 January, 2018. Yelm : Science Book Publishing House LLC, pp. 239–244.
- Mashkin, A., Fedotovskiy, S., Gunina, M. G., Solovov, Ya. Ya. et al. 2019. Method of modeling electric drives with digital control systems. E3S Web of Conferences: Intern. Scientific and Technical Conf. Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), 18–20 September, 2019, Kazan, Russia, Vol. 124. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402021>.
- Mashkin, A. V., Fedotovskiy, S. B. 2020. Modeling of asynchronous high frequency electric drives. Proceedings of the XXV-th Intern. Open Science Conf. *Modern Informatization Problems in Simulation and Social Technologies (MIP2020/SCT)*, Yelm, WA, USA, 10 January, 2020. Yelm : Science Book Publishing House LLC, pp. 148–154.
- Vodovozov, A., Chernyaeva, N., Zaripova, D. A., Zhakishev, B. A. et al. 2019. Energy model of electric drive of centrifugal borehole pump. E3S Web of Conferences: Intern. Scientific and Technical Conf. Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), 18–20 September, 2019, Kazan, Russia, Vol. 124. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402018>.
- Zhang, Z., Bazzi, A. M. 2020. Robust sensorless scalar control of induction motor drives with torque capability enhancement at low speeds. IEEE Intern. Conf. on Electric Machines and Drives (IEMDC), May 12–15, 2019, Westin San Diego, San Diego, CA, pp. 1706–1710. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785159>.

Сведения об авторах

Машкин Андрей Валерьевич – ул. Ленина, 15, г. Вологда, Россия, 160000; Вологодский государственный университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: mashkin_andrey75@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4580-3475>

Andrey V. Mashkin – 15, Lenina Str., Vologda, Russia, 160000; Vologda State University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: mashkin_andrey75@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4580-3475>

Федотовский Сергей Борисович – ул. Ленина, 15, г. Вологда, Россия, 160000; Вологодский государственный университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: fsb1960@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4906-2125>

Sergey B. Fedotovskiy – 15, Lenina Str., Vologda, Russia, 160000; Vologda State University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: fsb1960@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4906-2125>