

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВЕКТОРНО- АЛГОРИТМИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

С.Ю. Еремочкин

ORCID: 0000-0001-6753-8305 e-mail: S.Eremochkin@yandex.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Барнаул, Россия

Д.В. Дорохов

ORCID: 0000-0001-6564-5879 e-mail: danil.dorokhov.2000@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Барнаул, Россия

В статье представлены имитационные модели, позволяющие рассмотреть основные характеристики электропривода, что значительно снижает расходы на проведение опытных испытаний. Применение таких моделей оправдано на начальных этапах разработки новых схем частотных преобразователей с целью оценки характеристик. В частности, они использованы при разработке оригинальных схем частотных преобразователей векторно-алгоритмического типа, разработанных в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова. Эта разработка – альтернатива существующим частотным преобразователям, актуальная в ситуациях, когда у потребителя отсутствует доступ к трехфазной сети переменного тока, необходимой для эксплуатации широко распространенных трехфазных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, имитационное моделирование, *Matlab Simulink*, частотный преобразователь, электропривод.

Для цитирования: Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В. Моделирование электро-механических характеристик трехфазного электродвигателя при векторно-алгоритмическом управлении в среде *Matlab Simulink* // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 22-37. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_22

MODELING OF ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR WITH VECTOR-ALGORITHMIC CONTROL IN MATLAB SIMULINK

S.Y. Eremochkin

ORCID: **0000-0001-6753-8305** e-mail: **S.Eremochkin@yandex.ru**
Polzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russia

D.V. Dorokhov

ORCID: **0000-0001-6564-5879** e-mail: **danil.dorokhov.2000@mail.ru**
Polzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russia

Abstract. Currently, in most cases, electric motors are used to convert electrical energy into mechanical energy. Among them, the most common are three-phase asynchronous motors. There are some reasons for this. Squirrel cage induction motors have a reliable design, low cost, are easy to operate, and their characteristics are suitable for solving many problems. However, their operation puts forward a number of special requirements. In particular, a three-phase AC network is required for their connection. However, in some cases, individual consumers do not have access to a three-phase AC network. In this case, as an alternative to the existing frequency converters, it is possible to use original schemes of frequency converters of the vector-algorithmic type developed at Polzunov Altai State Technical University, that have a simpler design and low cost. At the initial stages of developing new circuits of frequency converters to evaluate the characteristics, it is justified to use computer modeling tools. Simulation models allow you to consider the main characteristics of the drive. In this case, the cost of pilot testing is significantly reduced.

Keywords: asynchronous electric motor, Matlab Simulink, simulation modeling, frequency converter, electric drive.

For citation: S.Y. Eremochkin and D.V. Dorokhov, “Modeling of electromechanical characteristics of squirrel cage induction motor with vector-algorithmic control in Matlab Simulink”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 22-37, 2023.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_22

I. Введение

Автоматизированный электропривод является важной частью современного промышленного производства, его энергетической и интеллектуальной основой [1-3]. Современный электропривод включает: электрический преобразователь, устройство управления, электродвигатель, механи-

ческую передачу, рабочий орган. Для его эффективной работы наиболее важен выбор электродвигателя. Он должен соответствовать всем техническим требованиям, таким как надежность, степень защиты, КПД, коэффициент мощности, частота вращения, мощность и т.д. На выбор электродвигателя также оказывают влияние условия рабочей среды – загрязненность воздуха, влажность, параметры питающей сети. К основным типам электродвигателей относят следующие: синхронный и асинхронный двигатель, двигатель постоянного тока и вентильный двигатель. Среди них наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные короткозамкнутые двигатели, которые отличаются высокой надежностью, прочностью, простотой в эксплуатации. Данный тип двигателей используется в большинстве приводов механизмов современных промышленных предприятий, домашних и фермерских хозяйств [4, 5]. Между тем, далеко не всегда возможно питание электродвигателей от трехфазной сети. В таких случаях встает вопрос о подключении двигателей к однофазной электрической сети.

Для решения данной проблемы в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова на базе кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод» разрабатываются устройства запуска, работы и регулирования скорости трехфазных электродвигателей, которые питаются от однофазной сети. Принцип работы подобных устройств основан на методе векторно-алгоритмического управления, который позволяет управлять вращающимся магнитным полем статора двигателя. Напряжение на статорные обмотки в этом случае подается по строго заданному алгоритму и нужной полярности. Использование данного принципа позволяет, в том числе, обеспечить дискретное регулирование угловой скорости электродвигателя. Целесообразность использования дискретного регулирования обусловлена особенностью ряда электроприводов, в которых не требуется обеспечения плавного регулирования скорости. Предлагаемое техническое решение по сравнению с известными обладает рядом преимуществ: его более низкая конечная стоимость и более высокая надежность. Эти преимущества возникают за счет упрощенной системы и органов управления и реализации только дискретного регулирования скорости.

Как правило, в основе материальной базы устройств управления полем статора двигателя лежат полупроводниковые элементы, такие как транзисторы, тиристоры и диоды. Одним из таких устройств является реверсивное полупроводниковое устройство регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя [6]. С помощью данного устройства можно осуществлять регулирование угловой скорости трехфазного асинхронного электродвигателя в широком диапазоне при пуске и работе от однофазной сети. Появляется возможность создания нескольких типов круговых полей

статора, в результате частота вращения электродвигателя меняется дискретно. На первых этапах проектирования подобных устройств частотного регулирования возникает необходимость в достаточно быстрой и недорогой проверке их работоспособности. В связи с высокой стоимостью создания опытных образцов, в последнее время все чаще прибегают к методам компьютерного моделирования. Подобный опыт широко распространен как среди российских, так и среди зарубежных специалистов [7-15].

II. Моделирование характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя при работе от трехфазной сети

Работа трехфазного асинхронного электродвигателя описывается сложной системой из дифференциальных и интегральных уравнений, поэтому выбор программного обеспечения для моделирования работы электропривода определяется возможностями программы в области решения математических уравнений, а также визуализации полученных в ходе виртуального эксперимента данных. Для создания имитационной модели преобразователя векторно-алгоритмического типа была выбрана интерактивная среда *Matlab Simulink*. Ее преимуществом по сравнению с другим программным обеспечением является возможность моделирования электрических машин, а также графическое отображение результатов моделирования.

Учитывая, что при векторно-алгоритмическом управлении двигателя статорные обмотки запитываются несимметрично, была разработана оригинальная математическая модель асинхронного двигателя, которая позволяет рассчитывать статические и динамические режимы при несимметричном питании. На основе оригинальной математической модели для моделирования характеристик электропривода была разработана имитационная модель трехфазного асинхронного электродвигателя [16]. Для создания модели математические уравнения асинхронного двигателя составляются из библиотечных блоков среды *Simulink*. Пример подсистемы вычисления коэффициента мощности показан на рис. 1.

После того как все уравнения составлены, все блоки-подсистемы объединяются в одну систему при помощи функции маскировки. Для системы задаются значения параметров, которые будут использоваться внутри системы во время расчетов, т.е. постоянные коэффициенты уравнений асинхронного двигателя. В итоге получается блок-модель асинхронного двигателя (рис. 2).

Моделирование параметров электропривода проводилось при питании двигателя от трехфазной сети. Был выбран асинхронный электродвигатель 4AA50B4У3, статорные обмотки которого соединены по схеме «звезда». Параметры электродвигателя представлены в табл. 1.

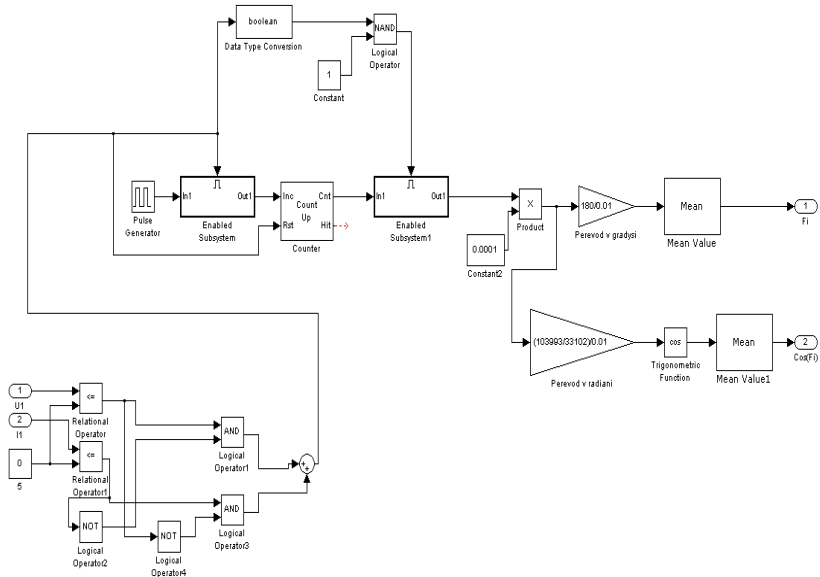


Рис. 1. Подсистема вычисления коэффициента мощности

Fig. 1. Power factor calculation subsystem

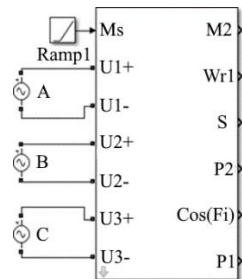


Рис. 2. Блок асинхронного двигателя

Fig. 2. Induction motor block

По паспортным данным электродвигателя были рассчитаны параметры схемы замещения (табл. 2). В начале времени моделирования осуществляется пуск электродвигателя на холостом ходу. В интервале времени от 0,2 до 0,35 с на вал двигателя подается линейно возрастающая до 0,64 Нм нагрузка, после чего увеличение подаваемого момента нагрузки прекращается. Результаты моделирования представлены на рис. 3-5.

Таблица 1.
Параметры электродвигателя

Table 1.
Motor parameters

Параметр	Значение
Номинальная мощность на валу P_n , кВт	0,09
Номинальное напряжение питания U_n , В	220
Синхронная частота вращения n , об/мин	1500
Частота питающего напряжения f , Гц	50
Номинальный коэффициент полезного действия η_n , %	55
Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi$, о.е.	0,6
Момент инерции на валу J , кг/м ²	0,000033

Таблица 2.
Параметры схемы замещения электродвигателя

Table 2.
Motor Equivalent Circuit Parameters

Параметр	Значение
Сопротивление статора r_1 , Ом	69,7754
Приведенное активное сопротивление ротора r_2' , Ом	112,6818
Индуктивность статора L_S , Гн	3,281
Индуктивность ротора L_R , Гн	3,315

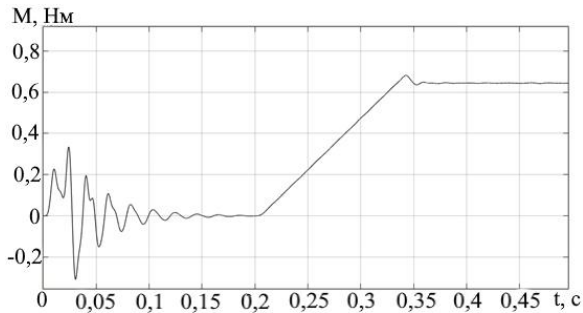


Рис. 3. Зависимость электромагнитного момента двигателя от времени при трехфазном питании

Fig. 3. The dependence of the motor electromagnetic moment on the time with three-phase power

Из рис. 3 видно, что пульсация момента, развиваемого двигателем, после разгона снижается практически до нуля. Момент двигателя, развиваемый под нагрузкой, равен 0,64 Нм.

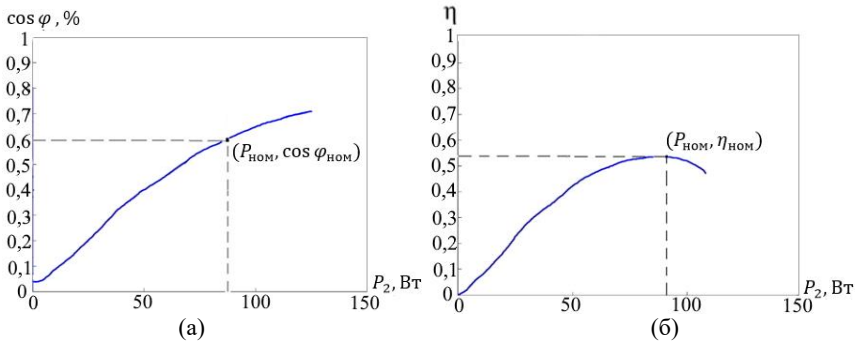


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности (а) и КПД (б) от мощности на валу двигателя

Fig. 4. The dependence of the power factor (a) and the efficiency (b) on the power on the motor shaft

Из графика на рис. 4, а, можно видеть, что коэффициент мощности электродвигателя растет при увеличении мощности на валу и достигает своего номинального значения $\cos \varphi = 0,6$ в момент достижения двигателем номинальной мощности. Из рис. 4, б видно, что КПД электродвигателя растет при увеличении мощности на валу и достигает своего номинального значения $\eta = 0,55$, которое является также максимальным в момент достижения двигателем номинальной мощности.

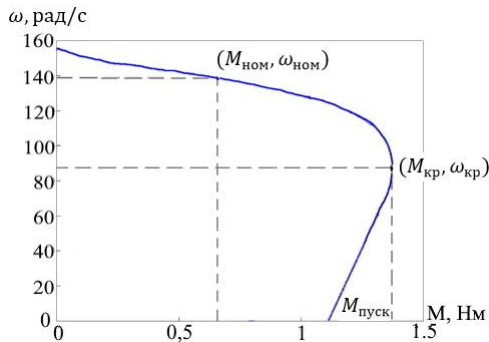


Рис. 5. Механическая характеристика, полученная в Matlab Simulink

Fig. 5. The mechanical characteristics obtained in Matlab Simulink

Из рис. 5 видно, что при номинальной нагрузке угловая скорость электродвигателя равна 1300 об/мин. Пусковой момент равен 1,1 Нм, критический – 1,4 Нм.

III. Моделирование характеристик электродвигателя при работе с частотным преобразователем

Для моделирования работы трехфазного асинхронного электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа было выбрано реверсивное полупроводниковое устройство регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя [6]. Принципиальная электрическая схема устройства изображена на рис. 6.

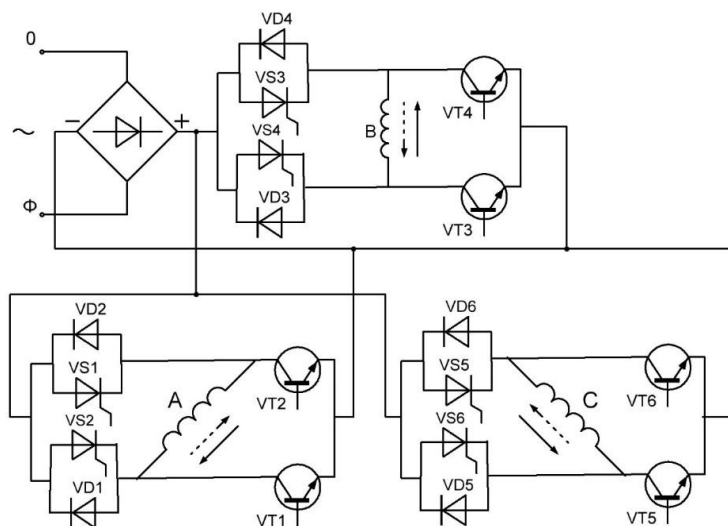


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема реверсивного полупроводникового устройства регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя

Fig. 6. Schematic diagram of a reversible semiconductor device for controlling the speed of a three-phase asynchronous electric motor

Данный преобразователь векторно-алгоритмического типа позволяет создавать три типа вращающегося поля статора путем последовательной смены четырех, шести или восьми фиксированных положений вектора магнитного потока. Для этого на транзисторы и тиристоры в схеме подаются управляющие сигналы по строго определенному алгоритму. Последовательность подачи сигналов на полупроводниковые элементы для вращающегося поля, которое состоит из шести фиксированных положений вектора

магнитного потока, представлено в табл. 3. Разделим период вращения поля на шесть равных промежутков времени. Прямое протекание тока по обмоткам статора двигателя на рисунке показано сплошной стрелкой, обратное – пунктирной. Первая, вторая и третья обмотка обозначены соответственно *A*, *B* и *C*.

Таблица 3.
Последовательность подачи сигналов на полупроводниковые элементы

Table 3.
The sequence of applying signals to semiconductor elements

Промежуток времени	Транзисторы						Направление тока в обмотке		
	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6			
	Тиристоры						<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6				
1		О		О		О	–	+	–
2		О		О	О		–	+	+
3		О	О		О		–	–	+
4	О		О		О		+	–	+
5	О		О			О	+	–	–
6	О			О		О	+	+	–

Примечание: О – открытое положение элемента;

«+» – прямое направление протекания тока; «–» – обратное направление

На рис. 7 представлена модель схемы управления двигателем реверсивного полупроводникового устройства регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя. При моделировании были использованы блоки импульсных генераторов *G1-G6*, посредством которых управляются транзисторы. Настройка блока генератора происходит в соответствии с заданным алгоритмом работы преобразователя частоты.

Блок *DC Voltage Source* является источником постоянного напряжения. Данный блок был использован с целью упрощения модели, при этом не теряя достоверности полученных данных. С блока напряжение подается на *VT1-VT6* и *VS1-VS6*, которые представляют собой модели и эмитируют работу реальных полупроводниковых устройств. Транзистор моделируется при помощи сопротивления R_{om} и ключа *SW*, которые соединены последовательно. Состояние ключа контролируется блоком логики – при единичном положительном сигнале ключ включается, при нулевом – выключается. Сигнал на логический вход подают импульсные генераторы *G1-G6* в соответствии с заданным алгоритмом. В модели ключа параллельно силовым выводам подключена последовательная *RC*-цепь, выполняющая сглаживающие функции.

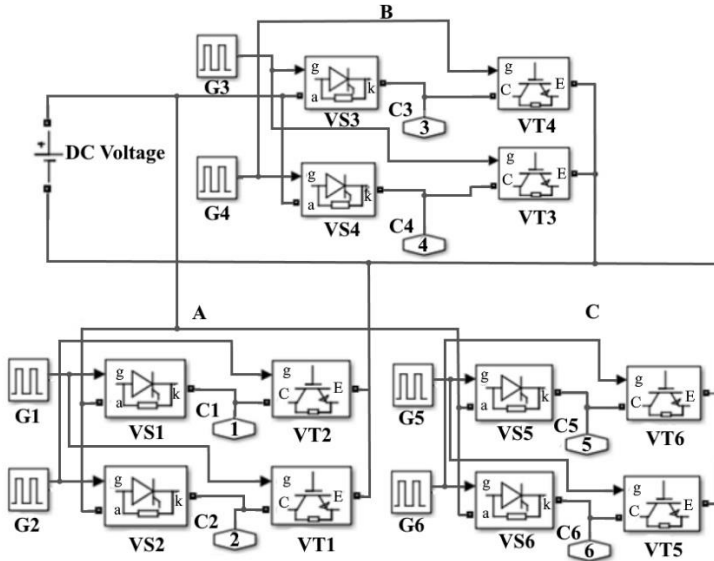


Рис. 7. Схема модели преобразователя векторно-алгоритмического типа

Fig. 7. Vector-algorithmic type converter model diagram

Блоки VT1-VT6, VS1-VS6, обмотки C1-C6 соединены согласно принципиальной электрической схеме преобразователя векторно-алгоритмического типа, изображенной на рис. 6. Для наглядности вся система свернута в один блок, который подключается к системе моделирования двигателя. Схема снятия характеристик электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа изображена на рис. 8.

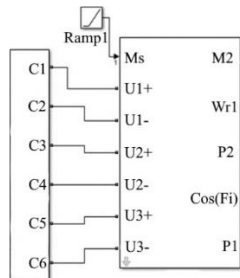


Рис. 8. Схема снятия характеристик электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа в среде *Matlab Simulink*

Fig. 8. Scheme for characterizing an electric motor with a vector-algorithmic type converter in a *Matlab Simulink* environment

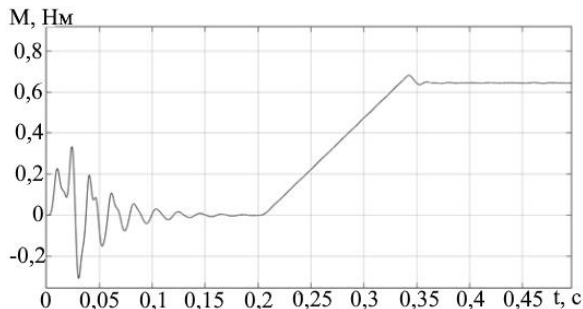


Рис. 9. Зависимость электромагнитного момента от времени для двигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа

Fig. 9. The dependence of the electromagnetic moment on time for an engine with a vector-algorithmic type converter

Из рис. 9 видно, что зависимость электромагнитного момента от времени для двигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа практически идентична зависимости момента двигателя от времени при питании от трехфазной сети.

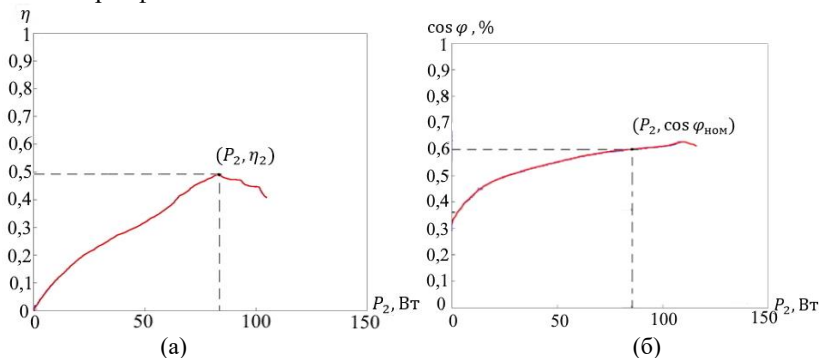


Рис. 10. Зависимость КПД (а) и коэффициента мощности (б) от мощности на валу электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа

Fig. 10. The dependence of the efficiency (a) and power factor (b) on the power on the motor shaft with a vector-algorithm type converter

Из графика, представленного на рис. 10, а, видно, что КПД электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа при номинальной мощности равен примерно 49 %.

Из рис. 10, б видно, что коэффициент мощности при работе электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа в разные промежутки времени остается близким к линейному при увеличении мощности на валу.

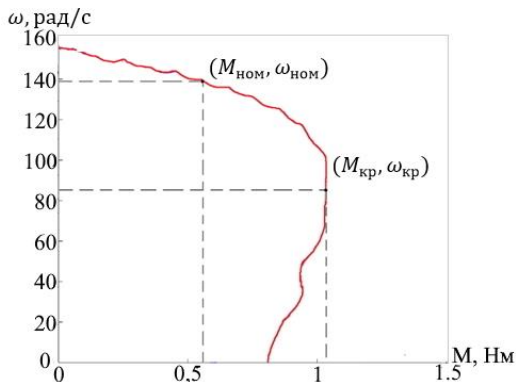


Рис. 11. График зависимости скорости от момента на валу электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа

Fig. 11. The graph of the dependence of speed on torque on the motor shaft with a vector-algorithmic type converter

Из рис. 11 видно, что пусковой момент электродвигателя равен $M_n \approx 0,8$ Нм, критический момент равен $M_{кр} \approx 1,0$ Нм, что практически совпадает с показателями, полученными при моделировании работы асинхронного двигателя от трехфазной сети.

Для сравнительной оценки результатов моделирования работы асинхронного электродвигателя от трехфазной сети и с преобразователем векторно-алгоритмического типа полученные при моделировании графики (рис. 4, 5 и 10, 11) были сопоставлены друг с другом. Сравнения рис. 4, а и 10, а показывает, что КПД двигателя при работе от трехфазной сети незначительно выше, чем при работе с преобразователем векторно-алгоритмического типа. Это объясняется появлением высокочастотных составляющих, а также тем, что по статорным обмоткам протекают несинусоидальные токи. При мощностях на валу выше номинальных, КПД двигателя снижается, что объясняется ростом переменных потерь при значениях тока выше номинального.

Из рис. 4, б и 10, б видно, что коэффициент мощности электродвигателя меньше, чем коэффициент мощности электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа при мощностях ниже номинальных.

Сравнение рис. 5 и 11 показывает, что пусковой момент электродвигателя при работе от трехфазной сети переменного тока равен $M_{\text{пуск1}} \approx 1,1$ Нм, критический момент $M_{\text{кр1}} \approx 1,4$ Нм. Пусковой момент двигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа равен $M_{\text{п2}} \approx 0,78$ Нм, критический момент $M_{\text{кр2}} \approx 1,05$ Нм.

IV. Выводы

В результате проведенных исследований с использованием средств компьютерного имитационного моделирования установлено, что трехфазный двигатель, управление которым происходит посредством преобразователя векторно-алгоритмического типа может нормально работать с номинальным моментом, а перегрузочная способность электродвигателя снижается незначительно. При этом необходимо отметить, что скорость двигателя и, как следствие, производительность механизма, использующего данный способ питания, снижается незначительно. КПД электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа при номинальной мощности достигает 49 %, что близко к значению 55 % при работе от трехфазной сети. Пусковой момент электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа равен $M_{\text{п2}} \approx 0.78$ Нм, что составляет 71 % от пускового момента $M_{\text{пуск1}} \approx 1.1$ Нм электродвигателя при работе от трехфазной сети.

Таким образом, применение исследуемого привода с использованием преобразователя векторно-алгоритмического типа является обоснованным и целесообразным при отсутствии трехфазной питающей сети.

© Еремочкин С.Ю., 2023

© Дорохов Д.В., 2023

Поступила в редакцию 04.09.2022

Received 04.09.2022

Библиографический список

- [1] Однокопылов Г.И., Букреев В.Г., Розаев И.А. Исследование отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 10. С. 69-81. DOI: 10.18799/24131830/2019/10/2299
- [2] Чернышева Т.А., Журиков С.А., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Асинхронный электропривод каротажных подъемников визуального контроля технического состояния скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 12. С. 26-34.
- [3] Trianni A., Cagno E., Accordini D. A review of energy efficiency measures within electric motors systems // Energy Procedia. 2019. Vol. 158. P. 3346-3351. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.964

- [4] Errouha M., Derouich A., Motahhir S., Zamzoum O., Ouanjli N., Ghzizal A. Optimization and control of water pumping PV systems using fuzzy logic controller // *Energy Reports*. 2019. Vol. 5. P. 853-865. DOI: 10.1016/j.egy.2019.07.001
- [5] Mehazzem F., Nemmour A., Reama A. Real time implementation of backstepping-multiscalar control to induction motor fed by voltage source inverter // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. № 42 (28). P. 17965-17975. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.035
- [6] Стальная М.И., Еремочкин С.Ю., Королев Д.А., Титова А.А. Реверсивное полупроводниковое устройство регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя, Пат. 2622394 RU, заявл. 16.12.15; опубл. 15.06.17. – Бюл. № 17.
- [7] Vijetha Inti V.V., Vakula V.S. Design and MATLAB/Simulink implementation of four switch inverter for microgrid utilities // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 117. P. 615-625. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.159
- [8] Singh B., Agrawal G. Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments // *Energy Reports*. 2014. Vol. 4. P. 418-434. DOI: 10.1016/j.egy.2018.07.004
- [9] Abdin Z., Webb C.J., MacA. Gray E. One-dimensional metal-hydride tank model and simulation in Matlab–Simulink // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. № 43 (10). P. 5048-5067. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.100
- [10] Hur S. Modelling and control of a wind turbine and farm // *Energy*. 2018. № 156. P. 360-370. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.071
- [11] El-Kharashi E., Massoud J.G., Al-Ahmar M.A. The impact of the unbalance in both the voltage and the frequency on the performance of single and cascaded induction motors // *Energy*. 2019. Vol. 181. P. 561-575. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.169
- [12] Bholra M., Kumar N., Ghoshal S.K. Reducing fuel consumption of Front End Loader using regenerative hydro-static drive configuration—an experimental study // *Energy*. 2018. Vol. 162. P. 158-170. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.006
- [13] Tang X., Zhang D., Liu T., Khajepour A., Yu H., Wang H. Research on the energy control of a dual-motor hybrid vehicle during engine start-stop process // *Energy*. 2019. Vol. 166. P. 1181-1193. DOI: 1016/j.energy.2018.10.130
- [14] Wu G., Yang J., Shang J., Fang D. A rotary fluid power converter for improving energy efficiency of hydraulic system with variable load // *Energy*. 2020. Vol. 195. P. 116957. DOI: 10.1016/j.energy.2020.116957
- [15] Ahmed A., Yelamali P., Udayakumar R. Modelling and simulation of hybrid technology in vehicles // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 589-594. DOI: 10.1016/j.egy.2019.11.123
- [16] Стальная М.И., Еремочкин С.Ю. Создание универсальной модели трехфазного электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа в среде *MATLAB SIMULINK* // XVI Межд. науч.-тех. конф. «Электроприводы переменного тока», Октябрь 05-09, 2015, Екатеринбург, Россия: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С. 149-152.

References

- [1] G.I. Odnokopylov, V.G. Bukreev and I.A. Rozaev, "Research of fault-tolerant switched-reluctance motor of electrical oil pump", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, vol. 330, no. 10, pp. 69-81, 2019. DOI: 10.18799/24131830/2019/10/2299
- [2] T.A. Chernysheva, S.A. Zhurikov, A.Yu. Chernyshev and I.A. Chernyshev, "Asinhronnyj elektroprivod karotazhnyh pod"emnikov vizual'nogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya skvazhin [Asynchronous electric drive for logging hoists for visual control of the technical condition of wells]", *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources]*, vol. 327, no. 12, pp. 26-34, 2016 (in Russian).
- [3] A. Trianni, E. Cagno and D. Accordini, "A review of energy efficiency measures within electric motors systems", *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3346-3351, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.964
- [4] M. Errouha, A. Derouich, S. Motahhir, O. Zamzoum, N. Ouanjli and A. Ghzizal, "Optimization and control of water pumping PV systems using fuzzy logic controller", *Energy Reports*, vol. 5, pp. 853-865, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.07.001
- [5] F. Mehazzem, A. Nemmour and A. Reama, "Real time implementation of backstepping-multiscalar control to induction motor fed by voltage source inverter", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17965-17975, 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.035
- [6] M.I. Stalnaya, S.Y. Eremochkin, D.A. Korolev and A.A. Titova, "Reversivnoe poluprovodnikovoe ustrojstvo regulirovaniya skorosti trekhfaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya [Reversible semiconductor device for speed control of a three-phase asynchronous electric motor]", Patent RU 2622394, Jun. 15, 2017 (in Russian).
- [7] V.V. Vijetha Inti and V.S. Vakula, "Design and MATLAB/Simulink implementation of four switch inverter for microgrid utilities", *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 615-625, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.159
- [8] B. Singh and G. Agrawal, "Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments", *Energy Reports*, vol. 4, pp. 418-434, 2018. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.004
- [9] Z. Abdin, C.J. Webb and E. MacA. Gray, "One-dimensional metal-hydride tank model and simulation in Matlab-Simulink", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 10, pp. 5048-5067, 2018. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.100
- [10] S. Hur, "Modelling and control of a wind turbine and farm", *Energy*, vol. 156, pp. 360-370, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.071
- [11] E. El-Kharashi, J.G. Massoud and M.A. Al-Ahmar, "The impact of the unbalance in both the voltage and the frequency on the performance of single and cascaded induction motors", *Energy*, vol. 181, pp. 561-575, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.169
- [12] M. Bhola, N. Kumar and S.K. Ghoshal, "Reducing fuel consumption of front end loader using regenerative hydro-static drive configuration-an experimental study", *Energy*, vol. 162, pp. 158-170, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.006

- [13] X. Tang, D. Zhang, T. Liu, A. Khajepour, H. Yu and H. Wang, "Research on the energy control of a dual-motor hybrid vehicle during engine start-stop process", *Energy*, vol. 166, pp. 1181-1193, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2018.10.130
- [14] G. Wu, J. Yang, J. Shang and D. Fang, "A rotary fluid power converter for improving energy efficiency of hydraulic system with variable load", *Energy*, vol. 195, pp. 116957, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.116957
- [15] A. Ahmed, P. Yelamali and R. Udayakumar, "Modelling and simulation of hybrid technology in vehicles", *Energy Reports*, vol. 6, pp. 589-594, 2020. DOI: 10.1016/j.egy.2019.11.123
- [16] M.I. Stalnaya and S.Yu. Eremochkin, "Creation of universal model of the three phase electric motor with vector algorithmic converter in the MATLAB SIMULINK, in proc. XVI Int. sci.-tech. conf. "AC electric drives", Oct. 05-09, 2015, Yekaterinburg, Russia, pp. 149-152.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Еремочкин Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация.

Sergey Y. Eremochkin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation.

Дорохов Данил Валерьевич, студент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация.

Danil V. Dorokhov, student of the Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation.