

Греков Э.Л., Безгин А.С.

Оренбургский государственный университет

ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОМЕНТОМ ДВУХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В статье рассматривается синтез системы прямого управления моментом двухфазного асинхронного электродвигателя с внешним ротором. В двигателях небольшой мощности размещение трехфазной обмотки может быть затруднительно. В этом случае используют двухфазную статорную обмотку. Также представляют интерес системы управления без датчика обратной связи по скорости для механизмов, к которым не предъявляются повышенные точности регулирования, либо вообще разомкнутые по скорости вращения. Последние используются в тяговых электроприводах передвижных установок, например электровелосипедах, скутерах. За основу взята известная система электропривода для трехфазных двигателей. В статье показан принцип разбиения пространственных положений вектора напряжения на 8 позиций в зависимости от номера включенных транзисторов двухфазного автономного инвертора. Синтезирован алгоритм формирования управляющих сигналов силовыми ключами в виде таблиц в зависимости от комбинаций состояний релейных регуляторов потокосцепления статора и электромагнитного момента, а также с учетом номера сектора текущего положения вектора потокосцепления. Каждый регулятор имеет три фиксированных состояния с переходами по петлям гистерезиса. Для проверки работоспособности алгоритма разработана имитационная модель тягового электропривода в системе MatLab Simulink. Показана структура системы управления и принцип табличного формирования сигналов управления силовой частью. Для ограничения полного тока статора введен дополнительный релейный регулятор тока, устанавливающий нулевые векторы напряжения при достижении амплитуды тока заданных значений. Для апробации системы управления спроектирован и изготовлен экспериментальный образец электропривода с системой управления на базе микроконтроллера STM32F407 с тяговым двухфазным трехполюсным асинхронным двигателем мощностью 500 Вт. Приведены графики экспериментальных исследований, доказывающие работоспособность предложенных технических решений.

Ключевые слова: прямое управление моментом, двухфазный асинхронный электродвигатель, двигатель с внешним ротором, автономный инвертор, потокосцепление статора, имитационная модель

ВВЕДЕНИЕ

В двигателях небольшой мощности размещение трехфазной обмотки в ограниченном пространстве может быть затруднительно [1, 2]. В этом случае используют двухфазную статорную обмотку, способную создавать вращающееся магнитное поле. Также представляют интерес системы управления без датчика обратной связи по скорости для механизмов, к которым не предъявляются повышенные точности регулирования, либо вообще разомкнутые по скорости вращения [3, 4]. Последние используются в тяговых электроприводах передвижных установок, например электровелосипедах, скутерах и т.д. [5, 6].

Достоинством системы прямого управления моментом является релейное регулирование потокосцепления статора и электромагнитного момента, что не требует точной настройки соответствующих регуляторов [7-10]. Более того, для построения системы управления с главной обратной связью по моменту в реализации физического датчика скорости нет необходимости.

В статье рассматривается синтез системы прямого управления моментом двухфазного асинхронного двигателя с внешним ротором.

ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Силовая часть электропривода представляет собой два однофазных транзисторных автономных инвертора VT1-VT4 для питания фазы A двигателя и VT5-VT8 для фазы B (рис. 1). За положительное направление проекций вектора напряжения по осям A и B будем считать включение транзисторов VT1, VT4 (фаза A) и VT5, VT8

(фаза B). Различные комбинации включения силовых транзисторов создают 8 пространственных положений вектора напряжения U_1 плюс две комбинации нулевого вектора, когда напряжение на обмотках отсутствует (рис. 2).

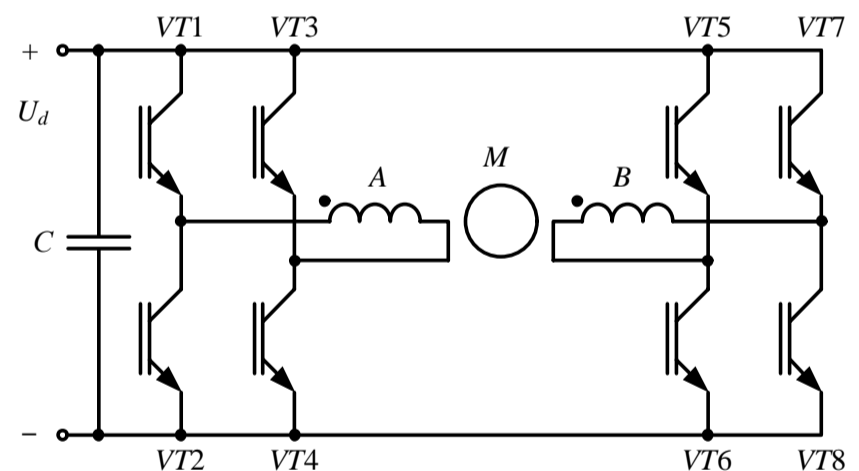


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема силовой части электропривода

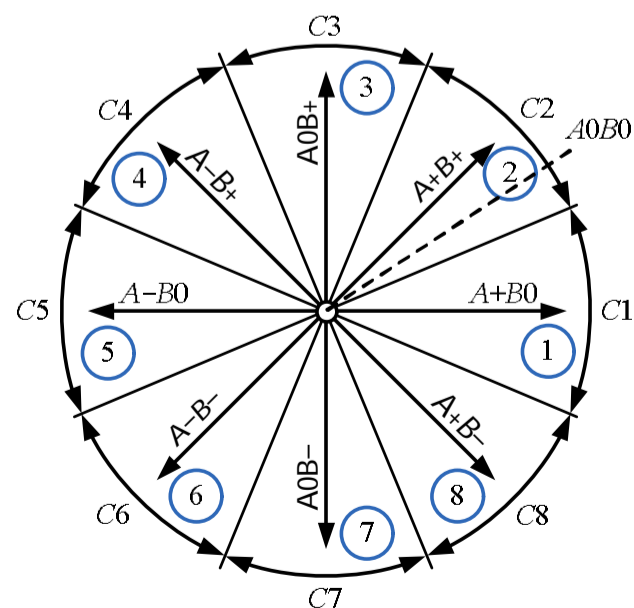


Рис. 2. Пространственные положения вектора U_1

При обозначении положений вектора знаком «+» отмечалось положительное направление напряжения в фазе, «-» – отрицательное, «0» – его отсутствие. Согласно принципу прямого управления моментом [6-8], вектор потокосцепления статора Ψ_1 может занимать такое же количество секторов, сколько позиций U_1 , больших нуля. Секторы на рис. 2 обозначены С1-С8. Границы секторов находятся по диагонали между соседними положениями U_1 . Примем нумерацию секторов Ψ_1 и позиций векторов U_1 одинаковыми против часовой стрелки.

В табл. 1 показано распределение импульсов управления по транзисторам для каждого номера позиции вектора U_1 («1» – включен, «0» – выключен).

Рассмотрим текущее положение вектора потокосцепления статора в секторе С1 (рис. 3). Направление вращения – против часовой стрелки. Если при этом требуется увеличить электромагнитный момент « $M+$ », то, согласно рис. 3, нужно включить векторы напряжения, находящиеся впереди вектора Ψ_1 (2, 3, 4). Для уменьшения момента « $M0$ » необходимо включить векторы 8, 7, 6 против направления вращения. Включение векторов напряжения 1 и 5 не приведет к существенному изменению электромагнитного момента « $M0$ ».

Конкретный выбор, какой из вышеперечисленных векторов напряжения включать, зависит от модуля самого вектора Ψ_1 . Для его увеличения « $\Psi+$ » необходимо включать векторы, сонаправленные с сектором 1 (2, 1, 8), для уменьшения « $\Psi-$ » – противоположные векторы (4, 5, 6).

Включение векторов 3 или 4 не приведет к существенному изменению модуля потокосцепления.

Если не требуется изменение момента и потокосцепления, необходимо включать нулевые векторы с индексом 9 или 10.

Для других секторов легко составить необходимые положения управляющих векторов напряжения. В табл. 2 приведены номера векторов U_1 , включаемые при различных комбинациях изменений потокосцепления и момента в зависимости от текущего положения вектора Ψ_1 .

Таблица 1

Распределение импульсов управления транзисторами

V_{Tx}	Номер позиции вектора напряжения U_1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
2	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
3	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0
4	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
5	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
7	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
8	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1

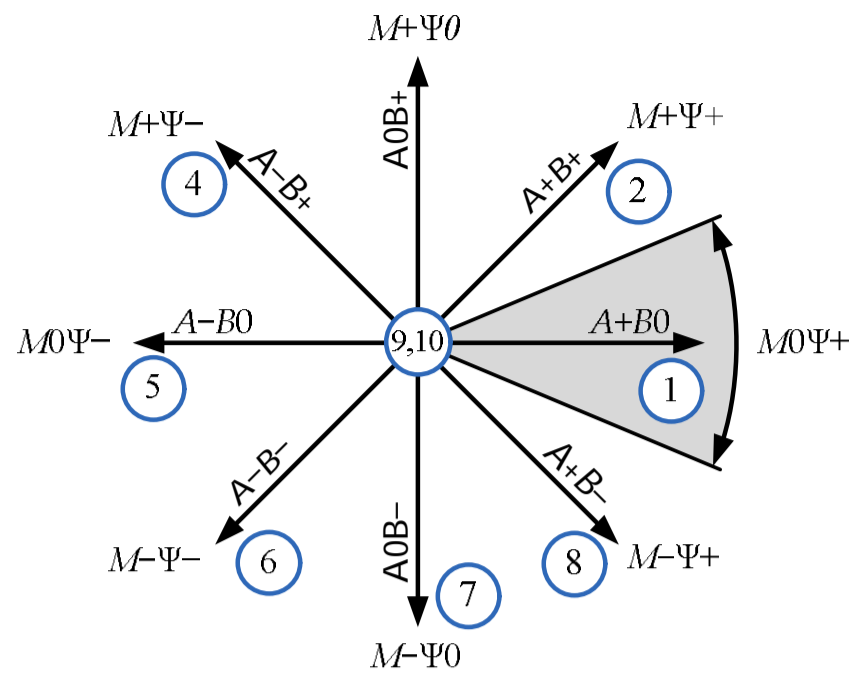


Рис. 3. Принцип формирования управляющего вектора выходного напряжения

Таблица 2

Номера включаемых векторов напряжения U_1

Выходы регуляторов		Сектор положения вектора Ψ_1							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ψ_1-	$M-$	6	7	8	1	2	3	4	5
	$M0$	5	6	7	8	1	2	3	4
	$M+$	4	5	6	7	8	1	2	3
Ψ_10	$M-$	7	8	1	2	3	4	5	6
	$M0$	9	10	9	10	9	10	9	10
	$M+$	3	4	5	6	7	8	1	2
Ψ_1+	$M-$	8	1	2	3	4	5	6	7
	$M0$	1	2	3	4	5	6	7	8
	$M+$	2	3	4	5	6	7	8	1

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Для проверки алгоритма управления была построена имитационная модель двухфазного электропривода в системе MatLab Simulink. Внешний вид модели представлен на рис. 4.

Модель состоит из блоков:

- «DTC», в котором производится расчет положений векторов напряжения;
- «Model AD», в котором рассчитываются модуль «Psi1» и текущее положение «Sector» вектора потокосцепления статора, значение электромагнитного момента « M » и модуль тока статора « I »;
- «ТрП А», «ТрП В» – однофазные автономные инверторы напряжения;
- «AD» – модель двухфазного асинхронного двигателя, построенная на основе модели [9];
- «РС» – пропорциональный регулятор скорости, введенный в модель для исследования динамических характеристик пуска, торможения и наброса нагрузки;
- «Регулятор M » – релейный трехпозиционный регулятор момента (PPM);
- «Регулятор $Psi1$ » – релейный трехпозиционный регулятор потокосцепления статора (РПИ);
- «Регулятор I » – релейный двухпозиционный регулятор тока статора (РРТ).

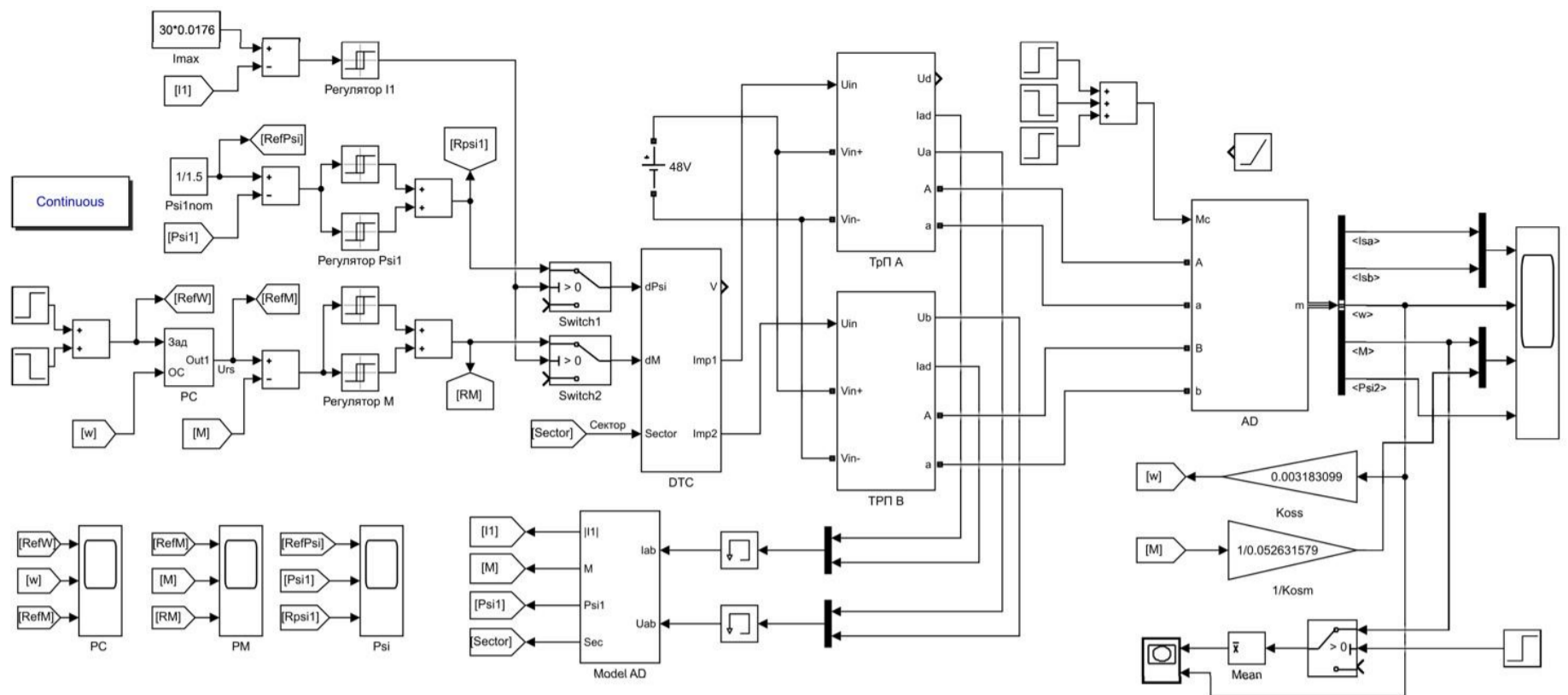


Рис. 4. Имитационная модель двухфазного электропривода

РРТ введен в систему управления для ограничения максимального тока в переходных режимах. При нормальной работе, когда обратная связь по току не достигает максимальных значений, выход РРТ установлен всегда в «1». С помощью ключей «Switch1» и «Switch2» выходы РРМ и РРП подключаются к соответствующим входам блока «DTC». При достижении тока максимальных значений выход РРТ переключается в «0», тем самым принудительно включая только нулевые векторы напряжения.

Структура блока «DTC» приведена на рис. 5. Блоки «Таблица векторов U» и «Таблица импульсов» настроены согласно табл. 2 и 1 соответственно (рис. 6). Структура блока «Model AD» приведена на рис. 7. Коэффициенты «Kost», «Kosn», «KosM», «KosPsi» рассчитываются таким образом, чтобы сигналы, действующие в системе управления, были приведены к плюс-минус 1 о.е. максимального значения.

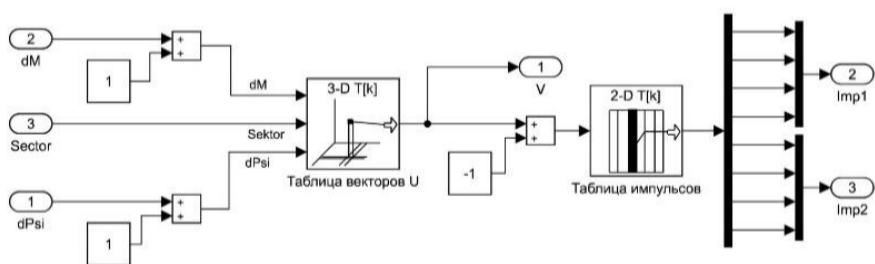


Рис. 5. Структура блока «DTC»

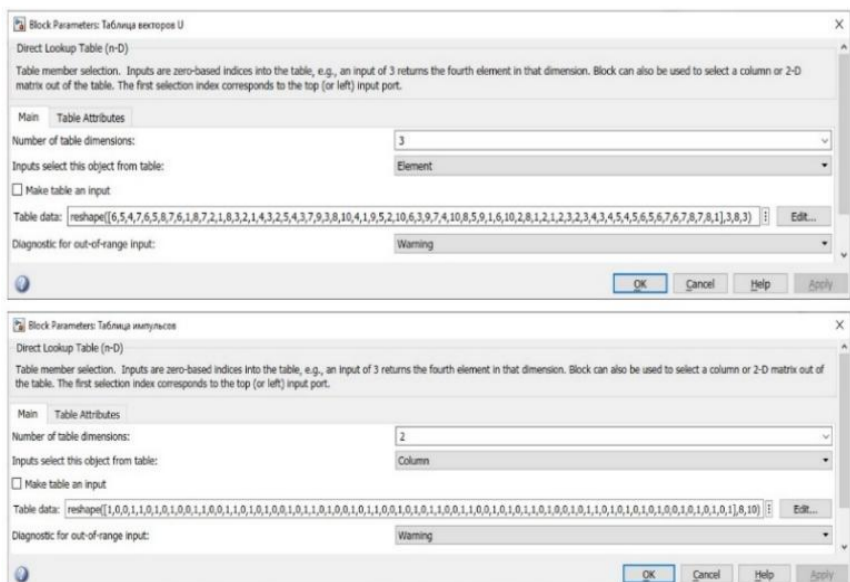


Рис. 6. Настройка блоков «Таблица векторов U» и «Таблица импульсов»

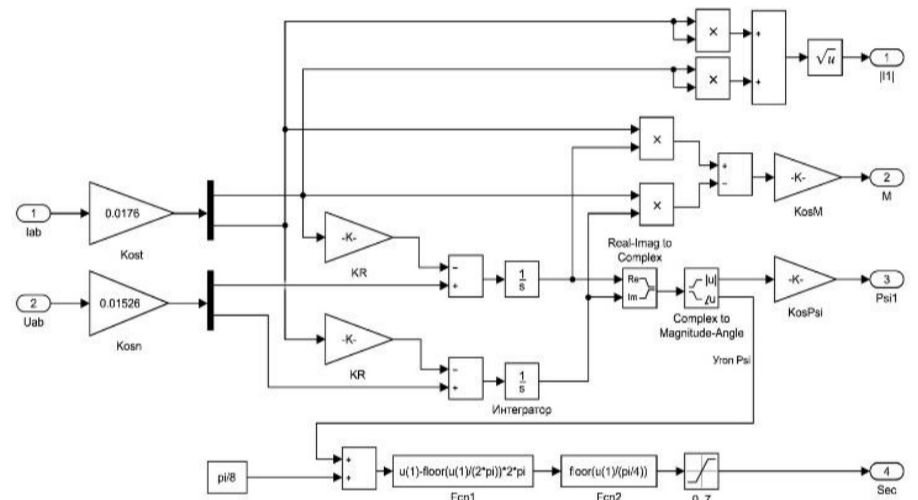


Рис. 7. Структура блока «Model AD»

Уравнения для расчета номера текущего сектора вектора потокосцепления реализованы в функциональных блоках «Fcn1» и «Fcn2» согласно уравнению (1):

$$Sector = \left\lfloor \frac{(\varphi + \pi/8) - \left\lfloor \frac{\varphi + \pi/8}{2\pi} \right\rfloor 2\pi}{\pi/4} \right\rfloor \quad (1)$$

Значком [...] обозначается функция определения целого значения (округление до ближайшего меньшего целого значения). Номера секторов в этом случае лежат в пределах 0...7.

Графики тока статора, скорости вращения, электромагнитного момента, потокосцепления ротора приведены на рис. 8.

Электропривод разгоняется вхолостую, затем происходит ступенчатый «наброс» номинальной нагрузки в двигательном и генераторном режимах. Через некоторое время электропривод останавливается вхолостую. Как видно из графиков, алгоритм прямого управления моментом двухфазного двигателя работоспособен.

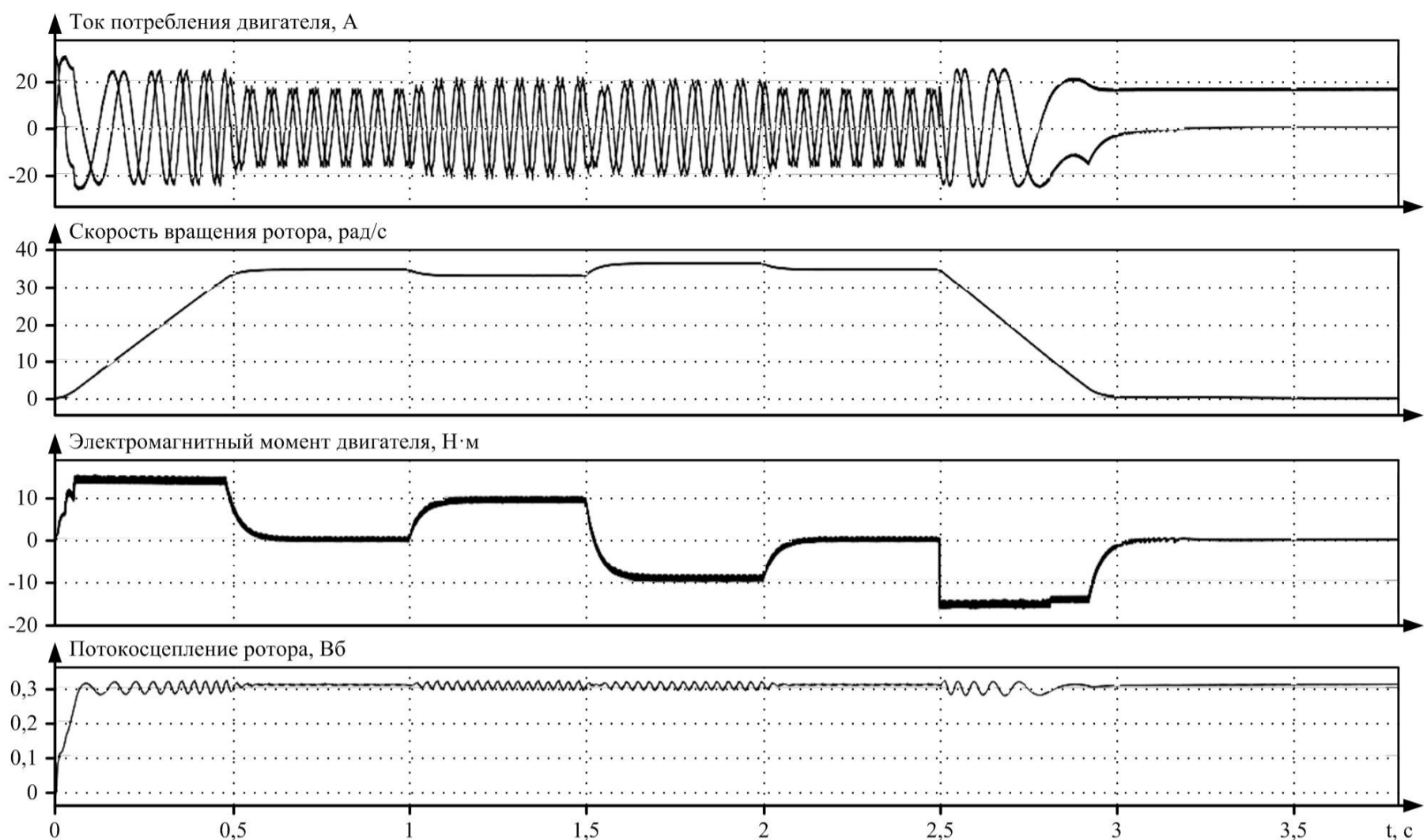


Рис. 8. Графики переходных процессов имитационной модели электропривода

АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ

Для апробации предложенного способа управления проведены экспериментальные исследования на двухфазном трехполюсном тяговом асинхронном двигателе мощностью 500 Вт [5]. Был разработан промышленный образец электропривода с системой управления с прямым управлением моментом на базе 32-разрядного микроконтроллера STM32F407VET6.

На рис. 9 представлены осциллограммы с датчиков тока и напряжения по фазе А в режиме холостого хода с выходной частотой 20 Гц при питании выходного инвертора источником постоянного напряжения 50 В.

На рис. 10 представлены графики изменения номера сектора потокосцепления статора (Sector), обратной связи по моменту и потокосцеплению ($M_{o.c.}$, $\Psi_{1 o.c.}$), скорости вращения ротора ω_p , взятые в цифровом виде из микроконтроллера, приведенные к относительным единицам. Произведен опыт пуска путем подачи ступенчатого задания на регулятор скорости, выключения силового инвертора и торможения двигателя до нулевой скорости.

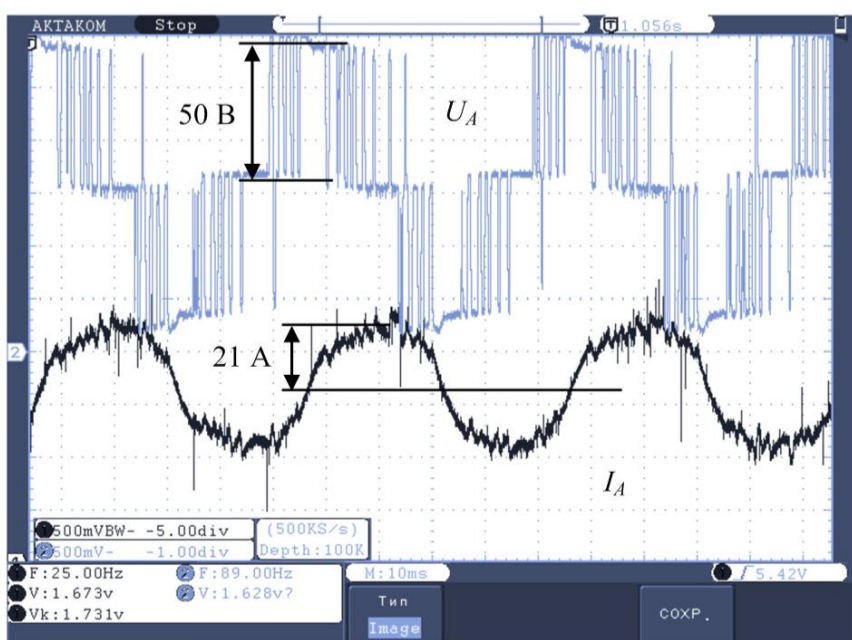


Рис. 9. Экспериментальные графики тока и напряжения в фазе А

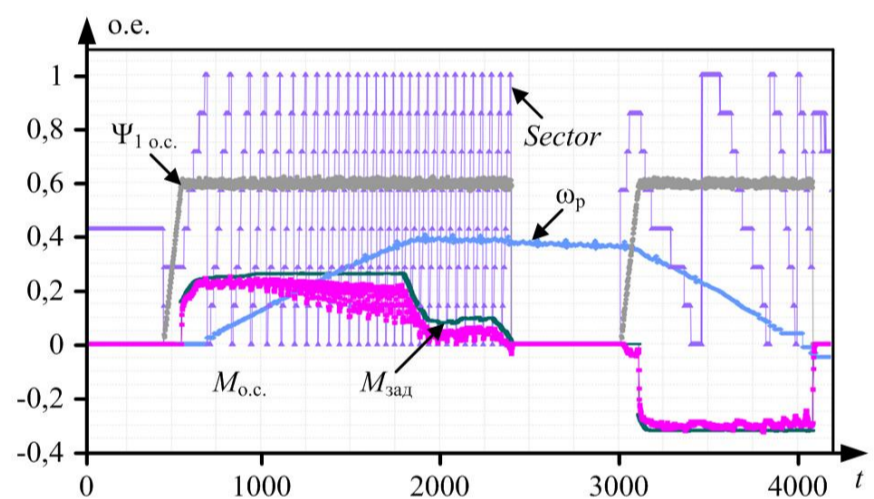


Рис. 10. Экспериментальные графики работы системы электропривода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из осциллограмм имитационной модели и экспериментальной установки, алгоритм прямого управления моментом двухфазного асинхронного электродвигателя работоспособен и может быть использован для реализации тяговых электроприводов передвижных установок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Овсянников Е.М., Нгуен К.Т. Система прямого управления моментом и потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 7. С. 27-30.
2. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor // IEEE Trans. Ind. Applications. 1986. Vol. IA-22(5). Pp. 820-827. doi: 10.1109/TIA.1986.4504799
3. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Барац Е.И. Адаптивная система прямого управления моментом асинхронного двигателя // Электротехника. 2001. № 11. С. 35-39.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Изд. центр «Академия», 2007. 272 с.
5. Об испытании двухфазного асинхронного электродвигателя

теля с внешним ротором и несимметричной обмоткой статора / Э.Л. Греков, М.П. Саликов, И.И. Ямансарин, А.С. Безгин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф. посвящ. 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса. Иваново: Иванов. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина, 2017. Т. III: Электротехника. С. 154-158.

6. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
7. Фираго Б.И., Васильев Д.С. Векторные системы управления электроприводами. Минск: Вышэйш. шк., 2016. 159 с.
8. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Lon-

Поступила в редакцию 14 сентября 2022 г.

don, U.K.: Oxford Science Publication, 1998. 729 p.

9. Безгин А.С. Математическая модель двухфазного асинхронного электродвигателя с разделенными обмотками и короткозамкнутым ротором в Matlab Simulink // Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации: сб. материалов Междунар. науч. конф., посвящ. 60-летию Оренбург. гос. ун-та. Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2015. Ч. 1. С. 270-276.
10. Shokhin V.V., Kornilov G.P., Permyakova O.V., Faryma V.N., Shestalyuk K.A. Investigation of braking modes in the electric drive with direct torque control system // Proceedings of International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021. Pp. 329-333. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446465

Принята к печати 12 октября 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DIRECT TORQUE CONTROL BY TWO-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

Eduard L. Grekov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automatic Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering, Institute of Energy, Electronics and Communications, Orenburg State University, Orenburg, Russia, aeptpm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4675-7378>

Aleksej S. Bezgin

Ph.D. (Engineering), Acting Head of Automatic Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering Department, Institute of Energy, Electronics and Communications, Orenburg State University, Orenburg, Russia, alex11_81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8597-6616>

The article considers the synthesis of a direct torque control system in a two-phase asynchronous electric motor with an external rotor. In low-power motors, the placement of a three-phase winding can be difficult. In this case, a two-phase stator winding is used. Control systems without a speed feedback sensor for mechanisms that do not require increased control accuracy, or even open-speed rotations are also of great interest. The latter are used in traction electric drives of mobile installations, for example, in electric bicycles and scooters. The well-known electric drive system for three-phase motors is taken as a basis. The article shows the principle of dividing the spatial positions of the voltage vector into 8 positions depending on the number of transistors included in a two-phase autonomous inverter. An algorithm for generating control signals by power keys in the tabular form is synthesized depending on the combinations of relay regulators states in the flow coupling of the stator and the electromagnetic moment, as well as taking into account the sector number of the current flow coupling vector position. Each regulator has three fixed states with transitions along hysteresis loops. To test the algorithm operability, a simulation model of a traction electric drive in the MatLab Simulink system has been developed. The control system structure and the principle of control signals tabular generation in the power unit are shown. To limit the total current of the stator, an additional relay current regulator has been introduced, which sets zero voltage vectors when the current amplitude reaches the set values. To test the control system, an experimental sample of an electric drive with a control system based on an STM32F407 microcontroller with a traction two-phase three-pole asynchronous motor with a power of 500 watts was designed and manufactured. The graphs of experimental studies proving the proposed technical solutions operability are presented.

Keywords: direct torque control; two-phase asynchronous electric motor; motor with external rotor; autonomous inverter; stator flow coupling; simulation model

REFERENCES

1. Ovsjannikov E. M., Nguen Kuang Thieu. Direct control of asynchronous motor rotor torque and flux linkage. *Izvestija vuzov. Mashinostroenie*. [Proceedings of Universities. Journal of Mechanical Engineering], 2011, no. 7, pp. 27-30. (In Russian)
2. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor // *IEEE Trans. Ind. Applications*. 1986, vol. IA-22(5), pp. 820-827. doi: 10.1109/TIA.1986.4504799
3. Braslavskij I.Ja., Ishmatov Z.Sh., Barac E.I. Adaptive direct control system of asynchronous motor torque. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2001, no. 11, pp. 35-39. (In Russian)
4. Sokolovskij G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovanjem*. [Alternating current electric drives with frequency control]. Moscow, Publishing center «Akademija», 2007. 272 p. (In Russian)
5. Grekov Je.L., Salikov M.P., Jamansarin I.I., Bezgin A.S. Tests of two-phase induction motor with external rotor and asymmetrical stator winding. *Sostojanie i perspektivy razvitiya jelektro- i teplotehnologii (XIX Benardosovskie chtenija): materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., posvjashh. 175-let. so dnja rozhdenija N.N. Benardosa*. [State and development prospects of electrical and heat power engineering (XIX Bernadosov talks). Materials of the international scientific conference devoted to 175th anniversary of N.N. Benardos]. Ivanovo, Lenin Ivanovo State Power Engineering University Publ., 2017, vol. III: Electrical Engineering, pp. 154-158. (In Russian)
6. Firago B.I., Pavljachik L.B. *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka* [Alternating current controlled electric drives]. Minsk, Tehnoperspektiva, 2006, 363 p. (In Russian)
7. Firago B.I., Vasiliev D.S. *Vektornye sistemy upravlenija elektroprivodami* [Vector control systems of electric drives]. Minsk, Vyshjeshaja shkola, 2016, 159 p. (In Russian)
8. P. Vas. Sensorless Vector and Direct Torque Control. London, U.K., Oxford Science Publication, 1998. 729 p.

9. Bezgin, A. S. Mathematical model of two-phase asynchronous electric drive with subdivided windings and squirrel-cage rotor in Matlab Simulink. *Nauka i obrazovanie: fundamentalnye osnovy, tehnologii, innovacii: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf., posvjashh. 60-letiju Orenburg. gos. un-ta* [Science and education: fundamentals, technology, innovations. Collection of scientific papers of the International scientific conference devoted to the 60th anniversary of Orenburg State University. Part 1.]. Orenburg, Orenburg State University Publ., 2015, pp. 270-276. (In Russian)
10. Shokhin V.V., Kornilov G.P., Permyakova O.V., Faryma V.N., Shestalyuk K.A. Investigation of braking modes in the electric drive with direct torque control system. Proceedings of International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2021, pp. 329-333. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446465
-

Греков Э.Л., Безгин А.С. Прямое управление моментом двухфазного асинхронного электродвигателя // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 4(57). С. 54-59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-54-59)

Grekov E.L., Bezgin A.S. Direct Torque Control by Two-Phase Asynchronous Electric Motor. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 54-59. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-54-59)
