

М.С. Сорокін, В.В. Гузенко, Ю.М. Хандола

Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна

МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ У ПАКЕТІ MATLAB

У представленій роботі розглядаються особливості дослідження математичного апарату моделі трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у пакеті matlab. Було розроблено модель в пакеті matlab, що описує роботу частотно-регульованого електропривода з урахуванням теоретичного аналізу та експериментальних досліджень.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, трифазний асинхронний двигун, програмно-апаратний комплекс, Matlab, частотно-регульований електропривод.

Постановка проблеми

Відомо, що трифазні асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором визначають основу сучасного електроприводу в багатьох галузях. Тому широке впровадження у практику частотно-регульованого електроприводу з АД, з кожним роком, робить все більше актуальнішою проблему теоретичного аналізу та експериментального дослідження [1-3]. Одним із основних етапів теоретичного аналізу є математичне моделювання та комп'ютерне дослідження. Поєднання математичного моделювання та сучасних комп'ютерних технологій, в основі яких лежать прикладні пакети, надає досліднику можливість глибокого вивчення процесів, що протікають у всіх ланках електроприводу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день відомо багато програмних пакетів для математичного моделювання: Derive, Macsyma, Maple, MathCad, Mathematica, MatLab, MicroCap, PSpice, Reduce, Theorist тощо. Комп'ютерному моделюванню силових напівпровідникових перетворювачів, електричних машин та електроприводів у MatLab присвячені [1 - 4].

Однією зі складових частин бібліотеки SimPowerSystem пакет MatLab є бібліотека Machines. Вона містить моделі електричних машин постійного та змінного струму. Розглянемо модель асинхронної машини із короткозамкненим ротором в абсолютних одиницях із цієї бібліотеки. Знак цієї моделі показано на рис. 1а. До входів А, В, С підключається джерело живлення, а на вхід Тm подається момент навантаження. Вихід m призначений для вимірювання та спостереження змінних стану машини. Вікно налаштування моделі

із введеними в нього параметрами двигуна 4А100Л4У3 показано на рис. 1 б. [3]

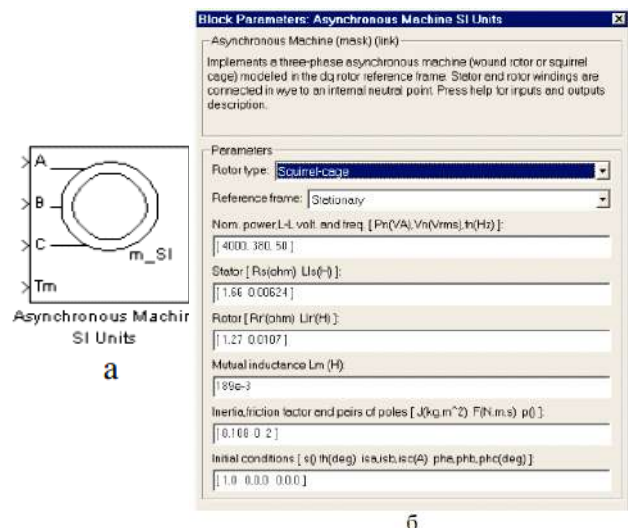


Рис. 1. Модель асинхронної машини з короткозамкненим ротором: а – піктограма; б – вікно налаштування;

У полях вікна налаштування задаються:

- 1) у першому полі – тип ротора (wound – фазний; squirrel-cage – короткозамкнутий);
- 2) у другому полі – система відліку;
- 3) у третьому полі – номінальні потужність, діюче значення та частота лінійної напруги;
- 4) параметри обмотки статора: активний опір та індуктивність від потоку розсіювання – у четвертому полі;
- 5) наведені до статора параметри обмотки ротора: активний опір та індуктивність потоку розсіювання – у п'ятому полі;
- 6) у шостому полі – індуктивність контуру, що намагнічує;
- 7) у сьомому полі – момент інерції ротора, коефіцієнт в'язкого тертя, кількість пар полюсів;

8) початкові умови (ковзання, кут повороту ротора, струми фаз статора, початкові фази струмів статора) – у восьмому полі.

При аналізі електромагнітних процесів у електромеханічних та статичних перетворювачах електричної енергії широко застосовується метод просторового вектора [4, 8, 9]. При таких методах миттєві значення симетричних трифазних змінних (напруги, струму, потокозчеплення) математично перетворюють в один вектор. Для переходу від миттєвих значень до просторового вектора всі трифазні змінні з урахуванням знака відкладаються з початку координат по осях і векторно підсумовуються [9]. Математичні перетворення для просторових векторів напруги та струму обмотки статора трифазного АД мають вигляд:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= \bar{u}_{1A} + \bar{u}_{1B} + \bar{u}_{1C} = u_{1A} + u_{1B}e^{-j\frac{2\pi}{3}} + u_{1C}e^{j\frac{2\pi}{3}} = \\ &= u_{1A} - \frac{1}{2}(u_{1B} + u_{1C}) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(u_{1C} - u_{1B}); (1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \frac{2}{3}(\bar{i}_{1A} + \bar{i}_{1B} + \bar{i}_{1C}) = \frac{2}{3}(i_{1A} + i_{1B}e^{-j\frac{2\pi}{3}} + i_{1C}e^{j\frac{2\pi}{3}}) = \\ &= \frac{2}{3}i_{1A} - \frac{1}{2}(i_{1B} + i_{1C}) - j\frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1C} - i_{1B}); (2)\end{aligned}$$

Коефіцієнт $2/3$ у рівнянні (2) називають коефіцієнтом узгодження. Його зазвичай вводять у рівняння просторового вектора струму з метою збереження балансу потужності у вихідній та перетвореній системі [10].

Мета статті

Аналіз та дослідження математичного апарату моделі трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у пакеті matlab.

Виклад основного матеріалу

На рис. 2 показано схему віртуальної установки з моделювання та дослідження процесів у трифазному АД з короткозамкненим ротором.

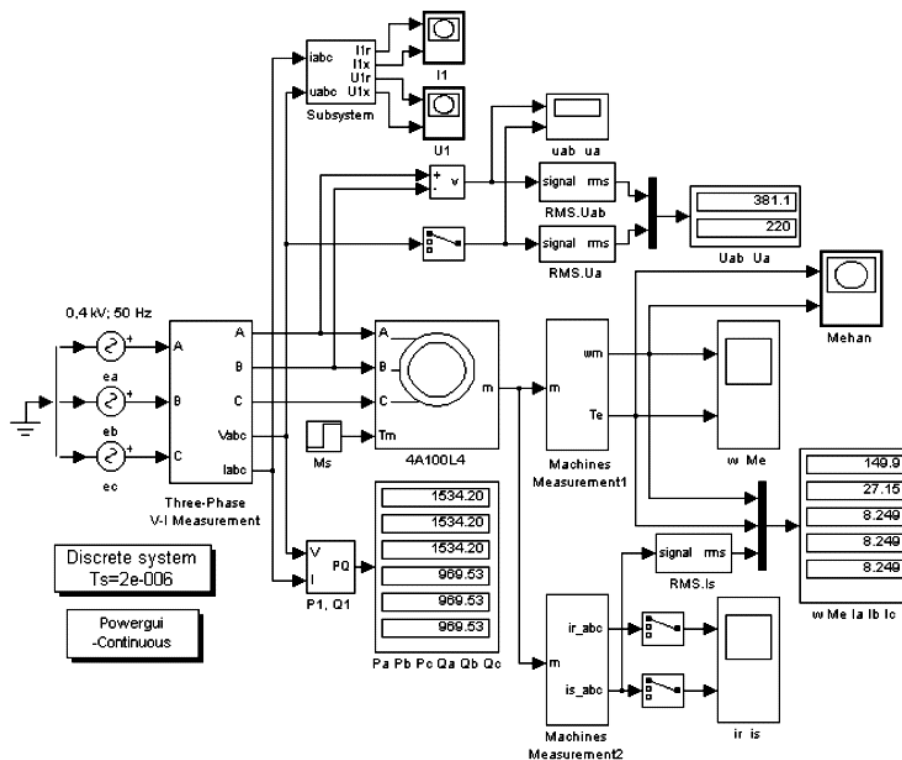


Рис. 2. Схема віртуальної установки за моделюванням та дослідженням процесів у трифазних АД з короткозамкненим ротором.

До складу аналізованої установки входять такі блоки:

1) джерело трифазної змінної напруги 0,4 кВ; 50 Hz скомпонований з трьох однофазних джерел ea, eb, ec, кожен з яких виконаний на основі блоку AC Voltage Source із бібліотеки SimPowerSystems/Electrical Sources;

2) вимірювач змінної трифазної напруги та струму Three-Phase V-I Measurement з бібліотеки SimPowerSystems/Measurements;

3) блок Selector із бібліотеки Simulink/Signal Routing, встановлений між блоками Three-Phase V-I Measurement і RMS.Ua, який дозволяє вибрати для спостереження одну з фазних напруг статора;

4) блок Voltage Measurement для з'єднання вимірювальних блоків бібліотеки Simulink із блоками пакет SimPowerSystems;

5) досліджуваний трифазний АД 4A100L4У3, виконаний на основі блоку Asynchronous Machine SI Units із бібліотеки SimPowerSystems/Machines;

6) блок Ms для завдання статичного моменту на валу АД, виконаний на основі блоку Step із бібліотеки Simulink/Sources;

7) вимірювач активної та реактивної потужності P1, Q1, виконаний на основі блоку 3-phase Instantaneous Active & Reactive Power з бібліотеки SimPowerSystems/Extra Library/Measurements;

8) блок Pa Pb Pc Qa Qb Qc, виконаний на основі блоку Display із бібліотеки Simulink/Sinks, для кількісного подання виміряних активних та реактивних потужностей фаз;

9) блок Subsystem із бібліотеки Simulink/Ports & Subsystems, за допомогою якого реалізовано обчислення просторових векторів напруги та струму статора АД відповідно до (1), (2);

10) блоки I1 і U1, виконані на основі блоку XYGraph із бібліотеки Simulink/Sinks, для спостереження годографів просторових векторів струму та напруги обмотки статора відповідно;

11) блок Mehan, виконаний на основі блоку XYGraph із бібліотеки Simulink/Sinks, для спостереження динамічної механічної характеристики;

12) два блоки вимірювання діючих значень лінійного RMS. Uab та фазного RMS.Ua напруг статора, виконані на основі блоку RMS із бібліотеки SimPowerSystems/Extra Library/Measurements;

13) блок Uab Ua для кількісного подання вимірюваних діючих значень лінійного та фазної напруги, виконаний на основі блоку Display із бібліотеки Simulink / Sinks;

14) два універсальні блоки вимірювання змінних машин Machines Measurement 1 і Machines Measurement 2 з бібліотеки Sim Power Systems / Machines;

15) блоки uab ua, wMe, i_r i_s, виконані на основі блоку Scope з бібліотеки Simulink / Sinks, спостереження кривих лінійної та фазної напруги, швидкості та електромагнітного моменту, струмів ротора та статора відповідно;

16) блок вимірювання діючих значень фазних струмів статора RMS.Is, виконаний на основі блоку RMS із бібліотеки Sim Power Systems / Extra Library / Measurements;

17) блок wMe Ia Ib Ic, виконаний на основі блоку Display із бібліотеки Simulink / Sinks, для кількісного представлення виміряних значень кутовий швидкості обертання ротора, електромагнітного моменту та діючих значень

фазних струмів із головної бібліотеки Simulink / Sinks;

18) два блоки Selector із бібліотеки Simulink / Signal Routing, встановлені між блоками Machines Measurement 2 та ir is, які дозволяють вибрати для спостереження один із фазних струмів статора та ротора;

19) блок Powergui із бібліотеки Sim Power Systems, що застосовується в даному випадку для аналізу спектрального складу кривих фазного напруги та струму статора;

Блоки Selector встановлені в положення, що дозволяють спостерігати осцилограми фазної напруги $u_{1A}(t)$ статора і фазних струмів $i_{1A}(t)$ статора та $i_{2A}(t)$ ротора. У табл. 1 наведено параметри, що задаються в полях вікон налаштування основних блоків моделі на рис. 3.

Таблиця 1.
Параметри, що задаються в полях вікон налаштування основних блоків моделі Simulink.

Найменування блоків	Найменування величин та параметрів	Значення величин та параметрів
Ea	Peak amplitude (V)	311,127
	Phase (deg)	0
	Frequency (Hz)	50
	Sample time	0
Three-Phase V-I Measurement	Voltage measurement	phase-to-ground
	Current measurement	Yes
Ms	Step time	0,75
	Initial value	0
	Final value	26,7
P1 Q1	Fundamental frequency (Hz)	50
RMS.Uab		
RMS.Ua		
RMS.Is		
Mashines measurement1	Machine type	Asynchronous
	Rotor currents [ia ib ic]	нет
	Stator currents [ia ib ic]	нет
Mashines measurement2	Machine type	Asynchronous
	Rotor speed (rad/s) or (pu)	нет
	Electromagnetic torque (N.m) or (pu)	нет

Амплітудні фазові значення напруг визначено на підставі діючих значень 220, а початкові фази в полях вікон налаштування джерел eb і ec встановлено рівними -120° і 120° . Кінцеве значення Final value у вікні налаштувань блоку Ms, що дорівнює 26,7 Нм, відповідає номінальному значенню для двигуна 4A100L4У3.

Для дослідження спектрального складу фазної і лінійної напруги на вкладках General і Data history вікна налаштувань блоку uab ua необхідно встановити параметри, наведені на рис. 3.

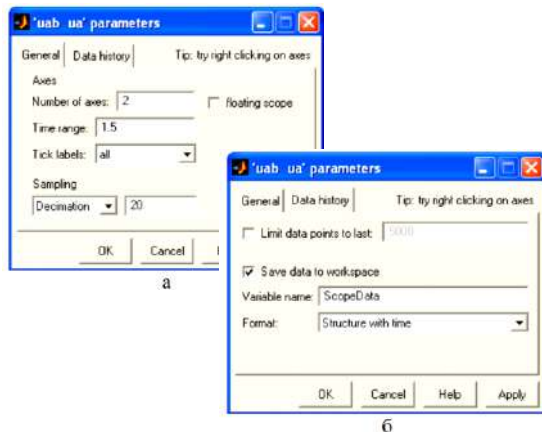


Рис. 3. Вікно налаштування блоку uab ua:
а – вкладка General; б – вкладка Data history

Вкладки General і Data history вікна налаштувань блоку ir is з введеними в них параметрами, необхідними для дослідження спектрального складу фазного струму обмотки статора, наведені на рис. 4.

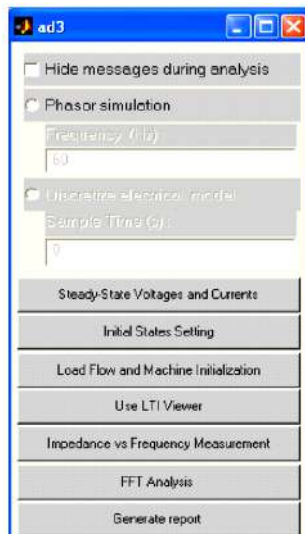


Рис. 4. Меню вікна налаштування блоку Powergui – Continuous

Параметри для розрахунку встановлювались через меню Simulation/Simulation Parameters.

Висновки і перспективи подальших досліджень

За допомогою запропонованої моделі може бути проведено кількісний та якісний аналіз електромагнітних та електромеханічних процесів у перехідних та встановлених режимах роботи, дослідження динамічної механічної та робочих характеристик, аналіз спектрального складу та годографів просторових векторів фазної напруги та струму АД. Розглянута модель може бути застосована не тільки при живленні АД від

трифазного джерела із синусоїдальною формою напруги, але і при живленні його від силових напівпровідникових перетворювачів.

Література

1. Дослідження моделі активного чотирьохквadrантного перетворювача магістрального електровоза змінного струму / Ю.Ф. Дубравін, В.П. Ткаченко // *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології»*. Бун. 34. К.: ДУІТ, 2019. С.155-174. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-13>.
2. Ruan J.Y., Wang S.M. Magnetizing Curve Estimation of Induction Motors in Single-Phase Magnetization Mode Considering Differential Inductance Effect // *IEEE Transactions On Power Electronics*. 2016. Vol.: 31, №. 1. P. 497-506. Available at: www.ieee.org.
3. Chioncel C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque // *International Conference on Applied Sciences* 2015. P.1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012005>
4. Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета MATLAB з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання Simscape / О.І. Толочко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Проблеми автоматизованого електропривода. Харків: НТУ «ХПІ», 2015, С.118-123.
5. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. / О.І. Толочко // *Навчальний посібник*. Київ, НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
6. Pakkiraiah B., Sukumar G.D. A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016 Vol.: 9(45). P. 1-10. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313>.
7. Бабій С. М. Комп'ютерна модель підйомної лебідки вантажного крана в середовищі Matlab / С. М. Бабій, А. М. Ратушина // *Zbiór artykułów naukowych. «Inżynieria i technologia. East European Conference»* (29.06.2017 – 30.06.2017) – Warszawa : Wydawca : Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2017. – 40 str. – S. 11–13
8. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовий – Кременчук, 2001. – 410 с.
9. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, М. В. Синявський [та ін.]. За ред. І. М. Голодного // *Навчальний посібник*. Київ: Аграр Медіа Груп, 2011. — 513 с.
10. Química, Bioquímica, Análise Sensorial e Nutrição no Processamento de Leite e Derivados / A. G. Cruz, P. B. Zacarchenco, C. A. F. Oliveira, C. H. Corassin. – 1st ed. – Rio de Janeiro (Brazil) : Elsevier, 2016. – 304 p.

References

1. Dubravin, YU.F., Tkachenko, V.P. (2019). Study of the model of the active four-quadrant converter of the main AC electric locomotive [Investigation of the model of an active quadrangular converter of a backbone electric locomotive]. Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies – *Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 34,155-174 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-13>
2. Ruan, J.Y., Wang, S.M. (2016). Magnetizing Curve Estimation of Induction Motors in Single-Phase Magnetization Mode Considering Differential Inductance Effect. *IEEE Transactions On Power Electronics*,1(31), 497-506. Available at: www.ieee.org.

3. Chioncel, C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. (2015). Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque. *International Conference on Applied Sciences*, 1 – 6 DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012005>
4. Tolochko O.I. (2015). Development of models of complex electromechanical systems in the environment of the MATLAB package using blocks of the virtual physical modeling application Simscape [Development of models of complex electromechanical systems in the environment of the MATLAB package using blocks of virtual physical simulation application Simscape]. // *Visnyk NTU KHPI Problems of the automated electric drive*. – *Bulletin of NTU KhPI. Problems of automated electric drive*, 118-123 [in Ukrainian]
5. Tolochko O.I. (2016). Modeling of electromechanical systems. Mathematical modeling of asynchronous electric drive systems [Modeling of electromechanical systems. Mathematical Modeling of Asynchronous Drive Systems]. A Tutorial, NTUU KPI, – 150 [in Ukrainian]
6. B. Pakkiraiah, G.D. Sukumar.(2016). A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(45), 1–10 DOI: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313>
7. Babii S. M. Kompiuterna model pidiomnoi lebidky vantazhnoho krana v seredovyshchi Matlab / S. M. Babii, A. M. Ratushna // *Zbiór artykułow naukowych. «Inżynieria i technologia. East European Conference»* (29.06.2017 – 30.06.2017) – Warszawa : Wydawca : Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2017. – 40 str. – S. 11–13
8. Modeling of electromechanical systems: a textbook / O. P. Chorny, A. V. Luhovoi, D. Y. Rodkin, H. Yu. Sysiuk, O. V. Sadovoi – Kremenchuk, 2001. – 410p. [in Ukrainian]
9. Adjustable electric drive. Theory. Modeling / I. M. Holodny, Yu. M. Lavrinenko, M. V. Sinyavskiy [and others].

Under the editorship I. M. Holodny // Educational manual. Kyiv: Agrar Media Group, 2011. — 513 p. [in Ukrainian]

10. Cruz, A. G., Zacarchenco, P. B., Oliveira, C. A. F., & Corassin, C. H. (2016). *Chemistry, Biochemistry, Sensory Analysis and Nutrition in the Processing of Milk and Dairy Products* (1st ed.). Elsevier [in Portuguese]

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Мірошник, Державний біотехнологічний університет, Україна.

Автор: СОРОКІН Максим Сергійович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
електромеханіки, робототехніки, біомедичної
інженерії та електротехніки
Державний біотехнологічний університет
E-mail – sorokin.ekt@btu.kharkov.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7524-7687>

Автор: ГУЗЕНКО Віталій Вікторович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
електромеханіки, робототехніки, біомедичної
інженерії та електротехніки
Державний біотехнологічний університет
E-mail – hnaghv@btu.kharkov.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8171-9487>

Автор: ХАНДОЛА Юрій Миколайович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
електромеханіки, робототехніки, біомедичної
інженерії та електротехніки
Державний біотехнологічний університет
E-mail – xandola@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9158-2955>

MODEL OF THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR WITH SHORT CIRCUIT ROTOR IN MATLAB PACKAGE

M. Sorokin, V. Huzenko, Y. Khandola

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

The presented paper examines the specifics of researching the mathematical apparatus of the model of a three-phase AM with a short-circuited rotor in the matlab package. It has been proven that three-phase AM with a short-circuited rotor form the basis of a modern electric drive in many branches of industry, agro-industrial complex and transport. A model was developed in the matlab package, which describes the operation of a frequency-regulated electric drive, taking into account theoretical analysis and experimental studies. In the scientific work, the task of combining mathematical modeling and modern computer technologies, which are based on application packages, is fulfilled, which gives the researcher the opportunity to deeply study the processes that occur in all links of the electric drive. With the help of the proposed model, quantitative and qualitative analysis of electromagnetic and electromechanical processes in transient and established modes of operation, research of dynamic mechanical and operational characteristics, analysis of spectral composition and hodographs of spatial vectors of phase voltage and current of an AM can be carried out. The considered model can be applied not only when powering an asynchronous motor from a three-phase source with a sinusoidal form of voltage, but also when powering it from power semiconductor converters. The scheme of a virtual installation for modeling and researching processes in a three-phase AM with a short-circuited rotor was developed in the work. The analyzed installation includes the following blocks: three-phase AC voltage source, three-phase AC voltage meter, Selector block, Voltage Measurement block, three-phase AM under investigation, static torque assignment block, active and reactive power meter, Subsystem block. An analysis of electromagnetic processes in static and electromechanical converters of electrical energy was carried out using the spatial vector method, which has found wide use. With the help of software packages, instantaneous values of symmetrical three-phase variables such as voltage, current, flux linkage were mathematically transformed into one vector.

Keywords: Computer modeling, three-phase asynchronous motor, hardware and software complex, Matlab, frequency-regulated electric drive.