

УДК 621.361.72

О.І. Толочко¹ (д-р техн. наук, проф.), І.В. Скоробогатова² (канд. техн. наук)¹ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Красноармійськ
кафедра електроприводу та автоматизації промислових установок,²Красноармійський індустріальний інститут, м. Красноармійськ
кафедра електромеханики и автоматики

E-mail: tolochko_oi@mail.ru; kitagea@rambler.ru

РОЗРОБКА SPS-МОДЕЛІ СИСТЕМИ «МЕХАНІЧНИЙ ВАЛ»

Виконано порівняльний аналіз комп'ютерних моделей асинхронного двигуна в середовищі пакета MATLAB, створених за допомогою блоків Simulink та блоку Asynchronous Machine бібліотек Power System Blockset і SimPowerSystems (SPS) різних версій. Виявлено недоліки і переваги досліджуваних варіантів. Продемонстровано нові можливості блоків бібліотеки SimPowerSystems (SPS) системи програмування MATLAB шляхом розробки SPS-моделі системи «механічний вал», що складається з двох асинхронних двигунів, працюючих на спільний вал. Отримано графіки перехідних процесів для електромагнітних моментів та кутової швидкості при прямому пуску двигунів та при стрибкоподібному навантаженні, що підтверджують адекватність моделі.

Ключові слова: асинхронний двигун, механічний вал, математичне моделювання, перехідні процеси, електромагнітний момент, кутова швидкість.

Загальна постановка проблеми. Питання математичного опису і моделювання асинхронних машин в літературі часто розглядаються спільно з питанням аналізу та синтезу різноманітних систем автоматизованого електроприводу на базі АД [1 – 3]. Трифазний асинхронний двигун (АД) з точки зору теорії автоматичного керування є нелінійним багатомірним об'єктом із досить складною структурою [5,6]. Різноманітність математичних моделей АД пов'язана зі способом живлення двигуна, з особливостями його конструкції (фазний ротор, біляча клітка, подвійна біляча клітка), зі зробленими при математичному описі припущеннями, із системою координат, у якій виконано його математичний опис, зі складом вхідних і вихідних сигналів моделі та із системою прийнятих відносних величин [4,7].

Час, що витрачається дослідником на «модельний експеримент» в значній мірі залежить від обраного ним програмного середовища. Величезної популярності при моделюванні електромеханічних об'єктів набув пакет MATLAB з програмою структурного моделювання Simulink і програмою віртуального моделювання систем, складених з електротехнічних, електромеханічних та електронних пристроїв SimPowerSystems (у попередніх версіях Power System Blockset). Методичні рекомендації щодо застосування тієї чи іншої моделі АД в середовищі пакета MATLAB допоможуть більш швидко і якісно отримати необхідні результати досліджень систем асинхронного електроприводу методом математичного моделювання.

Постановка задач дослідження. Simulink-моделі АД є достатньо складними [5 – 7]. При їх створенні легко помилитися як структурно, так і параметрично. Налаштування цих моделей потребує багато часу. Ці недоліки компенсуються багатофункціональністю моделей, тому що користувач легко може їх модифікувати у відповідності до своїх потреб. Модель АД бібліотеки Power System Blockset, що входила до пакетів MATLAB-5, MATLAB-6 виявилася дуже зручною для користувача, тому що не вимагала від нього глибокого знання математичного опису і часу на налаштування. Однак її не можна було використовувати при ускладненні механічної частини систем електроприводу на базі АД. Починаючи з версій MATLAB-7 авторами пакета ужито заходів щодо усунення останнього недоліку шляхом подальшого

розвитку концепції віртуального фізичного моделювання.

Метою даної роботи є показати на прикладі розробки моделі системи «механічний вал», що складається з двох асинхронних двигунів нові можливості додатку *SimPowerSystems* пакета.

Результати розробки і досліджень. Для конкретності в даній роботі оберемо для досліджень середовище *MATLAB R2013a*. В цій версії *Simulink* поширено додатком віртуального фізичного моделювання *SimScape*. До його складу поряд з фундаментальною бібліотекою процесів *Foundation Library (Electrical, Hydraulic, Magnetic, Mechanical, Pneumatic, Thermal)* входять такі бібліотеки як *SimElectronics, SimMechanics, SimHydraulics, SimDriveline* та *SimPowerSystems*. В даній статті ми розглянемо частково тільки деякі блоки поширення *SimPowerSystems* (SPS).

Бібліотека SPS призначена для моделювання електротехнічних схем, засобів силової електроніки та електричних машин. На відміну від *Simulink*, блоки бібліотеки SPS подано у вигляді позначень відповідних елементів на принципових електричних схемах. SPS-блоки мають такі особливості [3]:

– їх входи та виходи, на відміну від *Simulink*-блоків (S-блоків), не вказують напрямок передачі сигналу, бо вони фактично є еквівалентами електричних контактів;

– лінії зв'язку між SPS-блоками є моделями ідеальних (з нульовим опором) електричних проводів, по яким струм може протікати в обох напрямках;

– SPS- та S-блоки не можуть з'єднуватися один з іншим безпосередньо; сигнал від S-елементів можна передати до SPS-елементів тільки через керовані джерела енергії (*Controlled Voltage/Current Source*) SPS-бібліотеки *Electrical Sources*, а навпаки – через блоки бібліотек засобів вимірювання (*Measurements*);

– в моделі, яка отримує в собі SPS-блоки, має бути присутнім хоча б один з вимірювальних SPS-приборів, що пов'язано з особливостями перетворення SPS-моделі в еквівалентну розрахункову S-модель;

– в SPS-модель необхідно встановлювати блок *powergui*.

В розділі *Machines* бібліотеки *SimPowerSystems* представлені два блоки трифазної асинхронної машини: *Asynchronous Machine SI Units* (асинхронна машина в абсолютних одиницях системи СИ) та *Asynchronous Machine pu Units* (асинхронна машина у відносних одиницях).

Блоки мають порти A, B, C та a, b, c, що відповідають «електричним» затискачам статора та ротора відповідно. Крім «електричних» портів, моделі мають один механічний вхід та векторний «інформаційний» вихід m (від *measurements*), який передбачає подальшу обробку або фіксацію сигналів засобами базових блоків *Simulink*.

У бібліотеці *Power System Blockset* блоки *Asynchronous Machine* мали можливість працювати тільки з однією різновидністю механічний порту: моментом навантаження T_m .

В бібліотеці *SimPowerSystems* механічний порт «швидкість» w передбачено для моделювання механічного зв'язку двигунів при роботі їх на один вал. Механічний *Simscape*-порт призначений для створення механічних навантажень за допомогою інших блоків бібліотеки *Simscape*, що мають механічні обертові порти, наприклад, блоків розділу *Mechanical* фундаментальної бібліотеки *Foundational library*.

Їх зовнішній вигляд (див. рис. 1) визначається типом ротора та типом механічного входу, які встановлюються за допомогою меню параметрів *Rotor type* і *Mechanical input* вкладки *Configuration*. Блок *Asynchronous Machine* бібліотеки *SimPowerSystems* має ще одну новину у порівнянні з попередніми версіями. Параметри АД та можливість їх встановлення або коригування залежать від стану функції *Preset Model* (попередня ініціалізація моделі даними деякого двигуна) вкладки *Configuration*. У початковому стані (при знаходженні блоку в бібліотеці) ця функція має значення *No*, параметри вкладки *Parameters* мають певні значення, які після переміщення блоку у вікно моделі можна змінювати. В меню функції *Preset Model* наводиться перелік, з якого можна обрати конкретний двигун за його потужністю у кінських

силах НР ($1\text{HP} = 746\text{ Вт}$), діючим значенням лінійної напруги статора у V_{rms} , номінальною частотою в Hz та номінальною швидкістю в RPM (об/хв.). Вибір певного двигуна, підтверджений натисканням кнопки *Apply*, призводить до автоматичного встановлення відповідних параметрів у вкладці *Parameters*, які тепер не можуть бути скориговані користувачем. Слід зазначити, що до параметрів попередньо обраних двигунів не входять координати кривої намагнічування, тобто, ці координати задані тільки для одного двигуна, параметри якого встановлюються за замовченням (початковий стан моделі). Для того, щоб зробити дані попередньо обраного двигуна доступними до коригування, треба після вибору цього двигуна (*Apply*) знову встановити функцію *Preset Model* у значення *No*. Підкреслимо, що можливість ініціалізації моделі через встановлення певного набору параметрів АД передбачена тільки для двигунів з однією білячою кліткою на роторі.

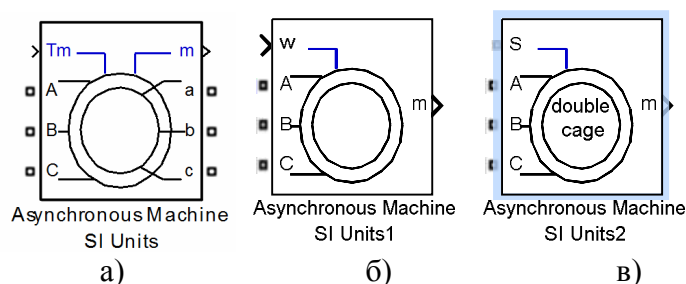


Рисунок 1 – Блоки *Asynchronous Machine SI Units* з різними типами ротора (*Rotor Type*) та механічних входів (*Mechanical input*):

- а – з фазним ротором (*Wound*) і з *Simulink*-портом «момент навантаження» T_m (*Torque*);
- б – з білячою кліткою на роторі (*Squirrel-cage*) і з *Simulink*-портом «швидкість» w (*Speed*);
- в – з двома білячними клітками (*Double squirrel-cage*) і з механічним *Simscape*-портом S

На рис. 2 представлена SPS-модель системи «механічний вал», що складається з двох асинхронних двигунів АМ1 та АМ2 з однаковими значеннями номінальної напруги та швидкості, але з різними номінальними моментами. Вони живляться від спільного трифазного SPS-джерела *Three-Phase Programmable Voltage Source*, яке задає трифазну систему фазних напруг з амплітудою і частотою, що відповідають номінальним параметрам АД.

Механічний зв'язок між двигунами здійснюється подачею швидкості w_1 першого двигуна АМ1, на механічний порт w другого двигуна АМ2. Спільний момент статичного опору M_c формується S-блоком *Step*, який імітує прикладання до валу двигуна номінального навантаження після досягнення ним усталеної швидкості, але перед подачею його на механічний порт T_m першого двигуна від нього віднімається електромагнітний момент M_2 , створений другим двигуном. Момент інерції другої машини при встановленні на ній швидкісного входного порту ігнорується, і відноситься до першого двигуна. При чому перша частина цієї операції виконується автоматично, тобто момент інерції зникає зі списку параметрів двигуна АМ2, а друга частина повинна бути виконана власноруч користувачем. У такий спосіб моменти обох двигунів підсумовуються і разом діють на спільну механічну масу з моментом інерції $J_{\Sigma} = J_1 + J_2$ згідно з рівнянням руху:

$$M_1 + M_2 - M_c = M_j = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

де M_1 – електромагнітний момент, створений першим двигуном АМ1, [Н·м]; M_2 – електромагнітний момент, створений другим двигуном АМ2, [Н·м].

Відповідна *Simulink*-модель механічної частини системи «механічний вал» показана на рис. 3.

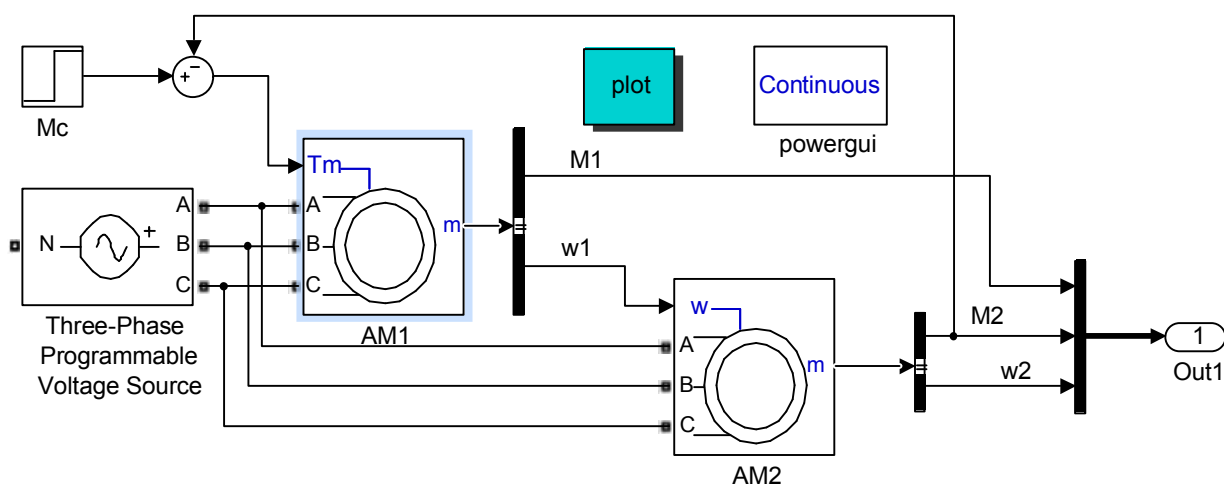


Рисунок 2 – SPS-модель системи «механічний вал»

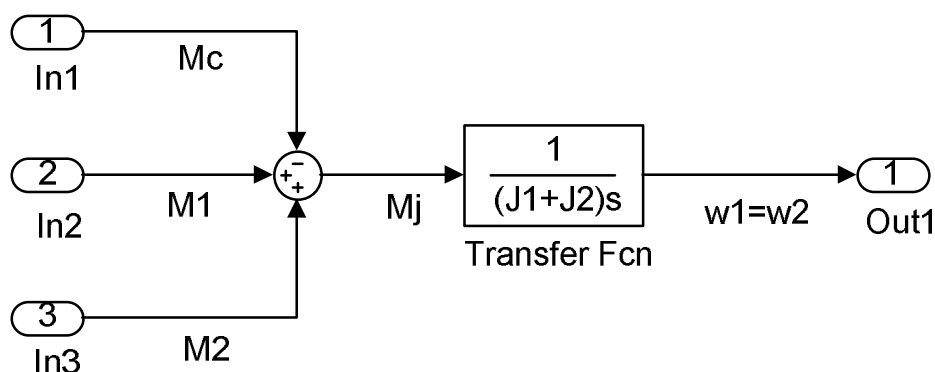


Рисунок 3 – S-модель механічної частини системи «механічний вал»

Слід зазначити, що в параметрах джерела і двигуна моделі рис. 2 треба задавати діюче значення лінійної напруги [Voltage (line-line / ph-ph) (V_{rms})], а також, що, на відміну від S-джерела *Sine Wave*, SPS-джерела використовують частоту не в рад/с, а в герцах (Hz), а фазовий зсув синусоїдальних сигналів – не в радіанах, а в градусах [Phase (deg.)].

Вибір необхідних сигналів M1, w1, M2, w2 із векторів вихідних сигналів двигунів здійснено S-блоками *Bus Selector* і об'єднано в один вектор блоком *Mux*. Реєстрація сигналів виконана вихідним портом *Out1*.

Дослідження системи «механічний вал» за допомогою моделі рис. 2 виконано для двигунів, обраних з використанням функції *Preset Model*:

– AM1 – 100 HP 460 V 60 Hz 1780 RPM;

– AM2 – 50 HP 460 V 60 Hz 1780 RPM.

Перехідні процеси в досліджуваній системі при прямому пуску та при стрибкоподібному навантаженні $M_c = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ в момент часу 0,7 с зображені на рис. 4.

Активний опір ротора двигуна AM1 приблизно втричі перевищує відповідний опір двигуна AM2. Як видно з наведених графіків, відповідно розподіляється навантаження між двигунами в усталеному режимі.

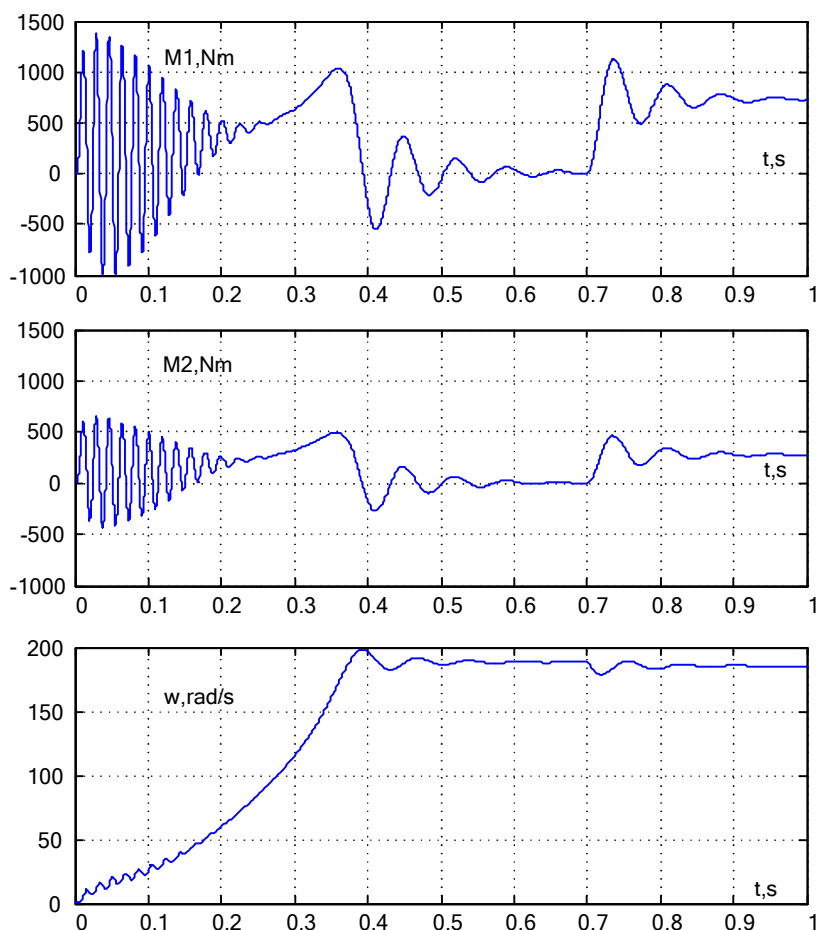


Рисунок 4 – Перехідні процеси системи «механічний вал»

Висновки.

1. Доповнення моделі *Asynchronous Machine* бібліотеки *SimPowerSystems* пакета можливістю замінювати механічний порт «момент навантаження» T_m механічними портами «швидкість» w і *Simscape*-портом *S* дозволяє втручатися у модель механічної частини двигуна, зокрема створювати моделі багатодвигунних електромеханічних систем з роботою двигунів на спільний вал.

2. Розглянута у статті SPS-модель системи «механічний вал», складеної з двох асинхронних двигунів, наочно демонструє її простоту у порівнянні з аналогічною *Simulink*-моделлю, і може бути рекомендованою для досліджень.

Список використаної літератури

1. SimPowerSystems User's Guide. / Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. – 402 p.
2. Герман-Галкин С.Г. MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.
3. Черних И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. / И.В. Черних. – М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. – 288 с.
4. Лазарев Ю.Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB. / Ю.Ф. Лазарев. – СПб: Питер, 2005. – 512 с.
5. Чорний О.П. Моделивання електромеханічних систем: [підручник] / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін [та ін.]. – Кременчук, 2001. – 376 с.
6. Шевченко І.С. Електромеханічні системи в асинхронному електроприводі: [навч. посібник] / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – Алчевськ: ДонДТУ, 2009. – 349 с.
7. Толочко О.І. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовищі пакета MATLAB/

- О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, Д.М. Мірошник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2003. – Т.1. – № 2 (19). – С. 199–202.
8. Нугдин В.И. Автоматизация проектирования и исследования электроприводов./ В.И. Нугдин. – Иваново: ИвГУ, 1978. – 79 с.
 9. Дьяконов В.П. Simulink 4: [специальный справочник] / В.П.Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
 10. Hoffman J. MATLAB and SIMULINK. Beispielerorientierte Einführung in die Simulation dynamischer Systeme / J. Hoffman. – AddisonWesley-Longman, 1998. – 505 p.

References

1. *SimPowerSystems User's Guide* (2009), Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc.
2. German-Galkin S.G. (2008) *MATLAB & Simulink. Proektirovanie mehatronnyh system na PK* [MATLAB & Simulink. Designing of mechatronic systems on a PC], Crown-Century, St. Petersburg, Russia.
3. Chernih, I.V. (2008), *Modelirovanie elektrotehnicheskoyh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink], DMK Press, Moscow, Piter, St. Petersburg, Russia.
4. Lazarev, Y.F. (2005), *Modelirovanie processov i system v MATLAB* [Modeling of processes and systems in MATLAB], St. Petersburg, Piter, Russia.
5. Chorniy, O.P., Lugovoi A.V, Rodkin D.Y., Sysyuk G.Y. and Sadovoy O.V. (2001), *Modelirovanie electromekhanicheskoyh system* [Modelling of electromechanical systems], Kremenchug, Ukraine.
6. Shevchenko I.S and Morozov D.I. (2009), *Electrmekhanichni systemy v asynhronnomu elektropryvodi* [Electromechanical systems in asynchronous electric drive], DonSTU, Alchevsk, Ukraine.
7. Tolochko, O.I., Chekavskyj H.S. and Miroshnik D.M. (2003), Vector model of induction motor in an environment package MATLAB, *Visnyk Kremenchuc'kogo dergavnogo politehnichnogo universytetu: Naukovi praci KDPU*, vol.1., vol. 2 (19). pp. 199-202.
8. Nugdin, V.I. (1978), *Avtomatozaciya proektirovaniya i issledovaniya elektroprivodov* [Automation of designing and research of electric drives], Ivanovo, IvNU, Russia.
9. Dyakonov V.P. (2002), *Simulink 4. Specialniy spravochnik* [Simulink 4. Special reference book], Piter, St. Petersburg, Russia.
10. Hoffman–Bonn J. (1988), *MATLAB and SIMULINK. Beispielerorientierte Einführung in die Simulation dynamischer Systeme*, AddisonWesley-Longman.

Надійшла до редакції:
30.03.2015

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Є.О. Башков

О.И. Толочко, И.В. Скоробогатова

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

КИИ ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».

Разработка SPS-модели системы «механический вал». Выполнен сравнительный анализ компьютерных моделей асинхронного двигателя в среде пакета MATLAB, созданных с помощью блоков Simulink и блока Asynchronous Machine библиотек Power System Blockset и SimPowerSystems (SPS) различных версий. Выявлены недостатки и преимущества исследуемых вариантов. Продемонстрировано новые возможности блоков библиотеки SimPowerSystems системы программирования MATLAB путем разработки SPS-модели системы «механический вал», который состоит из двух асинхронных двигателей, работающих

на общий вал. Получены графики переходных процессов для электромагнитных моментов и угловой скорости при прямом пуске двигателей и при скачкообразном набросе нагрузки, которые подтверждают адекватность модели.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, механический вал, математическое моделирование, переходные процессы, электромагнитный момент, угловая скорость.

O.I. Tolochko, I.V. Skorobogatova

Donetsk National Technical University, KII Donetsk National Technical University

The development of SPS-system model "mechanical wave". A variety of mathematical models of the asynchronous motor is connected with the process of the power of the engine, with the features of its design (wound rotor, squirrel cage, double squirrel cage), with the assumptions made due to mathematical description, the coordinate system in which a mathematical description is carried out, the composition of the input and output signal models and the system adopted by the relative values. Three-phase induction motor in terms of control theory is a nonlinear multidimensional object with a fairly complex structure. Time spent by the researcher on "model experiment" depends on the software environment. The huge popularity during simulation of electromechanical objects was acquired by a MATLAB program of structural modeling Simulink and virtual simulation software systems composed of electrical, electromechanical and electronic devices SimPowerSystems (in previous versions of Power System Blockset). Guidelines on the application of a model of the induction motor in the environment of MATLAB help more quickly and accurately obtain the necessary results of the research of the asynchronous electric systems by mathematical modeling. Simulink-model of the induction motor are quite complex. Setting up of these models requires a lot of time. These shortcomings are compensated by multifunction models, because the user can easily modify them to suit your needs. Comparative analysis of computer models of the induction motor in the environment of MATLAB, created with Simulink blocks and block libraries Asynchronous Machine Power System Blockset and SimPowerSystems (SPS) of different versions was performed. Pros and Cons of the investigated variants were identified. New features of blocks of library SimPowerSystems of MATLAB programming system were demonstrated through the development of SPS-system model "mechanical wave", which consists of two induction motors operating on a common shaft. Transient charts for electromagnetic moments and angular velocity for direct start motors and lashed abrupt load that confirm the adequacy of the model were obtained.

Keywords: induction motor, mechanical shaft, mathematical modeling, transient, electromagnetic torque, angular velocity.



Толочко Ольга Іванівна, Україна, закінчила Донецький політехнічний інститут, д-р тех. наук, професор, зав. кафедри електропривода та автоматизації промислових установок ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м Красноармійськ, 85300, Україна). Основний напрямок наукової діяльності – розробка і дослідження систем керування електромеханічними об'єктами.



Скоробогатова Інна Валеріївна, Україна, закінчила Донецький національний технічний університет, канд. техн. наук, старший викладач кафедри електромеханіки та автоматики. КІП ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 85300, Україна). Основний напрямок наукової діяльності – моделювання, дослідження та автоматизація теплотехнічних процесів.