

О. І. ТОЛОЧКО, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри ЕАПУ ДонНТУ, м. Красноармійськ

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ В СЕРЕДОВИЩІ ПАКЕТА MATLAB З ВИКОРИСТАННЯМ БЛОКІВ ДОДАТКУ ВІРТУАЛЬНОГО ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ SIMSCAPE

Введення. У багатодвигунних системах електроприводу та в системах керування складними електромеханічними об'єктами з розгалуженими кінематичними схемами, що враховують пружні зв'язки в кінематичних передачах, доволі часто використовують електричні двигуни змінного струму, зокрема асинхронний та синхронний. Ці двигуни з точки зору теорії автоматичного керування є нелінійними багатомірними об'єктами із досить складною структурою [1, 2].

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 фізичного моделювання SimScape [3-5]. До його складу поряд з фундаментальною бібліотекою процесів Foundation Library (Electrical, Hydraulic, Magnetic, Pneumatic, Thermal) входять такі бібліотеки як SimElectronics, SimMechanics, SimHydraulics, SimDriveline та SimPowerSystems.

Розробку математичних моделей складних електромеханічних об'єктів можна суттєво спростити, скориставшись можливостями поширень SimPowerSystems та Mechanical.

Блоки цих поширень постійно удосконалюються та відповідно змінюються. Методичні рекомендації щодо їхнього застосування допоможуть більш швидко і якісно отримати необхідні результати досліджень складних електромеханічних систем методом математичного моделювання.

Постановка задачі. Simulink-моделі електричних двигунів, особливо двигунів змінного струму, є достатньо складними. 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.

Віртуальні фізичні моделі двигунів у додатку Power System Blockset, що входив до пакетів MATLAB-5, MATLAB-6 і який, починаючи з версії MATLAB-6.1, змінив свою назву на SimPowerSystems, виявилися дуже зручними для користувача, тому що не вимагали від нього глибокого знання математичного опису і швидко налаштовувались. Однак їх не можна було використовувати при ускладненні механічної частини систем електроприводу.

Починаючи з версії MATLAB-7, авторами пакета ужито заходів щодо усунення цього недоліку. Спочатку у блоків електродвигунів з'явилась опція, яка надала можливість користувачеві, у разі необхідності, замінювати основний вхідний механічний порт Tm (момент навантаження) портом w «швидкість», що створило передумови для моделювання багатодвигунних систем електроприводу, працюючих на спільний механічний вал. Потім, після переміщення додатку SimPowerSystems в бібліотеку віртуального фізичного моделювання SimScape, ця опція була доповнена можливістю підключення до двигунів механічного Simscape-порта S, призначеного для створення механічних навантажень за допомогою віртуальних механічних блоків бібліотеки Simscape, що мають механічні обертові порти.

У такий спосіб, шляхом подальшого розвитку концепції віртуального фізичного моделювання, блоки електричних машин набули більшої гнучкості за рахунок можливості приєднання до них механічних блоків і забезпечення необхідних, прихованих від користувача, змін в математичних моделях двигунів.

Метою даної роботи є показати на прикладі розробки моделей дводвигунної системи «механічний вал» та двомасової електромеханічної системи з асинхронними двигунами нові можливості програми віртуального фізичного моделювання SimScape пакета MATLAB.

Матеріали досліджень. Для конкретності в даній роботі оберемо для модельного експерименту середовище MATLAB R2013a. Спочатку розглянемо основні концепції, використані авторами пакету при створенні додатку SimPowerSystems (SPS). Бібліотека SPS призначена для моделювання електротехнічних схем, засобів силової електроніки та електричних машин. Блоки бібліотеки SPS подано у вигляді позначень відповідних елементів на принципових електричних схемах. SPS-блоки мають такі особливості [5]:

- 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 провідів, 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);

© О.І. Толочко, 2015

- 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* можливістю варіації механічних вхідних портів наділені такі блоки: *Asynchronous Machine SI Units* (асинхронна машина в абсолютних одиницях системи СИ), *Asynchronous Machine pu Units* (асинхронна машина у відносних одиницях), *Permanent Magnet Synchronous Machine* (синхронний двигун з постійними магнітами) та *DC Machine* (двигун постійного струму)).

Розглянемо детальніше блок *Asynchronous Machine SI Units* (рис.1). Він має порти А, В, С та а, b, с, що відповідають електричним затискачам статора та ротора відповідно. Крім електричних портів, моделі мають один механічний вхід та векторний інформаційний вихід *m* (*measurements*), який передбачає подальшу обробку або фіксацію сигналів засобами базових блоків *Simulink*.

Зовнішній вигляд блоку визначається типом ротора та типом механічного входу, які встановлюються за допомогою меню параметрів *Rotor type* і *Mechanical input* вкладки *Configuration*.

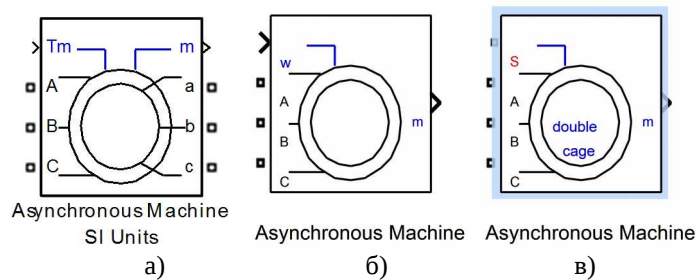


Рис. 1. – Блоки *Asynchronous Machine SI Units* з різними типами ротора (*Rotor Type*) та механічних входів (*Mechanical input*):

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

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 кіньських силах НР (1НР = 746 Вт), діючим значенням лінійної напруги статора у *Vrms*, 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.

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.

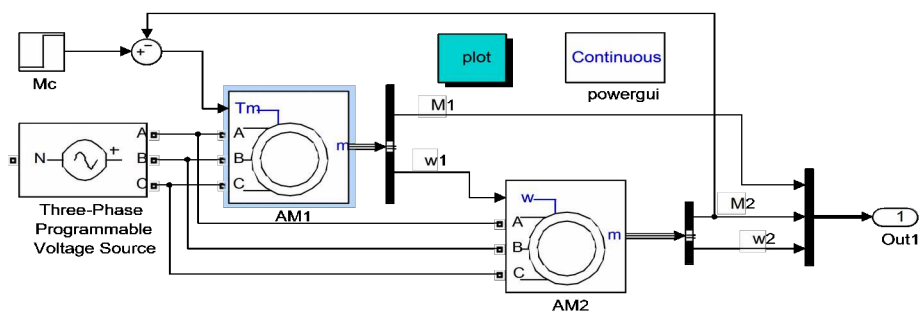


Рис. 2. – SPS-модель системи «механічний вал»

Механічний зв'язок між двигунами здійснюється подачею швидкості ω_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 іншим 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 $J_s = J_1 + J_2$ згідно з рівнянням руху:

$$M_1 + M_2 - M_c = M_j = J_s \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

де M_1 – електромагнітний момент, створений першим двигуном АМ1;

M_2 – електромагнітний момент, створений другим двигуном АМ2.

Дослідження системи «механічний вал» за допомогою моделі рис. 2 виконано для двигунів, обраних з використанням функції *Preset Model*: АМ1 – 100 HP 460 V 60 Hz 1780 RPM; АМ2 – 50 HP 460 V 60 Hz 1780 RPM.

Перехідні процеси в досліджуваній системі при прямому пуску та при стрибкоподібному накиді навантаження $M_c = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ в момент часу 0,7 с зображені на рис. 3

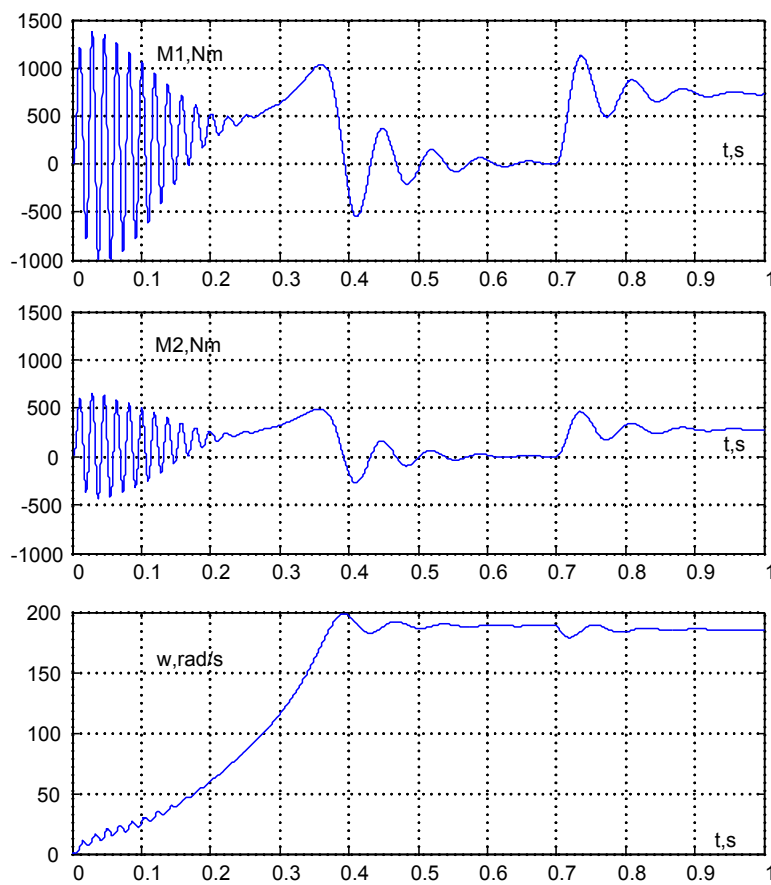


Рис. 3. – Перехідні процеси системи «механічний вал»

Активний опір ротора двигуна АМ1 приблизно втричі перевищує відповідний опір двигуна АМ2. Як видно з наведених графіків, відповідно розподіляється навантаження між двигунами в усталеному режимі.

На рис. 4 подана модель асинхронної машини з використанням механічного *Simscape*-порту для моделювання двомасової електромеханічної системи з урахуванням моменту тертя, що діє на другу масу (робочий орган виконавчого механізму).

Механічна частина досліджуваної системи описується рівняннями:

$$\begin{cases} M - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_{12} - M_f = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \\ \Delta\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2, \\ \frac{d\Delta\varphi_{12}}{dt} = \omega_{-2}, \\ M_{-2} = c_{-2} \Delta\varphi_{-2}, \end{cases} \quad (2)$$

де J_1, ω_1 – момент інерції та кутова швидкість першої маси (двигуна); J_2, ω_2 – момент інерції та кутова швидкість другої маси (механізму); M, M_{12}, M_f – електромагнітний момент АД, пружний момент та момент тертя відповідно; $c_{12}, \Delta\omega_{12}, \Delta\varphi_{12}$ – коефіцієнт пружності кінематичної передачі, різниця кутових швидкостей на її кінцях та кут її скручування.

Вона реалізована за допомогою блоків розділу *Mechanical* фундаментальної бібліотеки (*Foundational library*) інструментів *SimScope*.

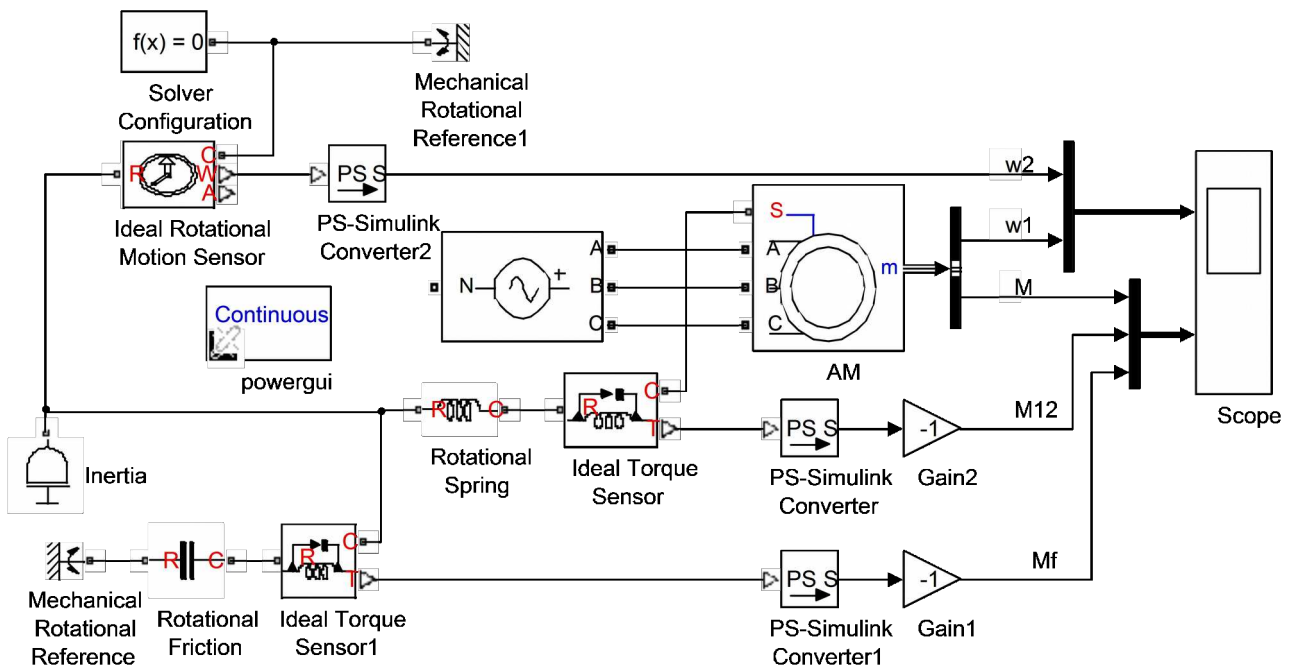


Рис. 4. – Модель двомасової електромеханічної системи на базі АД, що реалізована за допомогою «електричних» та «механічних» блоків

В моделі рис. 4 друга маса представлена блоком *Inertia*, пружний вал – блоком *Rotational Spring*, а тертя – блоком *Rotational Friction* бібліотеки *Rotational Elements*. Блок *Mechanical Rotational Reference* прив'язує конкретну точку механічної системи до каркасу або до землі.

Блок *Rotational Friction* формує момент тертя за рівняннями [6]:

$$M_f = \begin{cases} \frac{M_{brk}}{\omega_{th}} \omega, & \text{нпу } |\omega| \leq \omega_{th}; \\ \left[M_C + M_S e^{(-c_s |\omega - \omega_{th}|)} + f_v |\omega - \omega_{th}| \right] \text{sign}(\omega), & \text{нпу } |\omega| > \omega_{th}, \end{cases} \quad (3)$$

де M_{brk} – тертя спокою (зрушування), тобто початковий момент тертя при розгоні (*Breakway friction torque*); M_C – кулонівська компонента тертя (*Coulombic friction torque*), тобто момент так званого «сухого» тертя, амплітуда якого не залежить від величини швидкості; $M_S = M_C - M_{brk}$ – компонента Штрібека (*Stribeck*), яка існує при умові врахування різниці між тертям спокою та тертям руху; c_s – коефіцієнт експоненціальної складової тертя (*Transitional approximation coefficient*); f_v – коефіцієнт в'язкого тертя (*viscous Friction coefficient*); ω_{th} – межа лінійної ділянки (*Linear region velocity threshold*) статичної характеристики тертя $M_f(\omega)$, зображеної на рис. 5.

Насправді коефіцієнт лінійної ділянки характеристики $M_f(\omega)$ дорівнює ∞ , тобто досліджувана функція має в точці $\omega=0$ розрив першого роду. Наявність таких ланок у замкнених контурах створює великі проблеми

при цифровому моделюванні, пов'язані з дискретністю за часом, відсутністю «нуля» при використанні арифметики із плаваючою точкою, особливістю організації ітераційних процесів вибору кроку чисельного інтегрування диференціальних рівнянь.

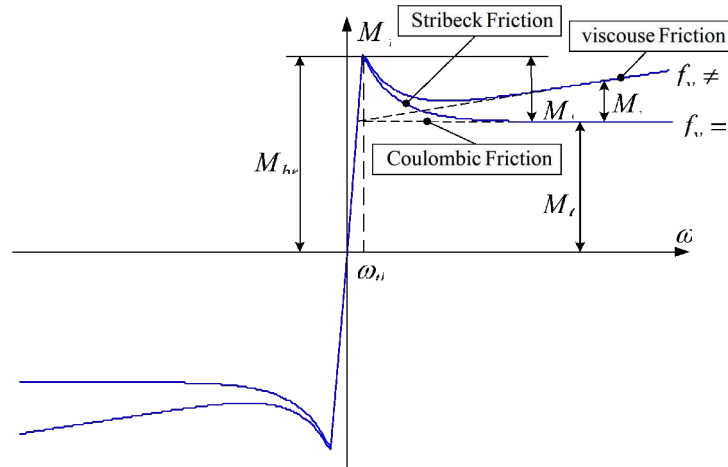


Рис. 5. – Статична характеристика тертя, реалізованого SimScape-блоком Rotational Friction

Одним з виходів із цієї ситуація є заміна розривних функцій неперервними функціями з великим, але кінченим коефіцієнтом підсилення лінійної ділянки в зоні розриву. Автори програмного забезпечення стверджують, що гарного компромісу між точністю моделювання і робастністю моделі та швидкістю розрахунків можна досягти при $\omega_{th} = (10^{-5} \div 10^{-3})$ рад/с. Необхідно зауважити, що таке спрощення характеристики тертя приводить до того, що при моделюванні процесу гальмування електромеханічна система не зупиняється, а рухається навколо нуля з дуже малою швидкістю.

Перехідні процеси у двомасовій системі, отримані за допомогою моделі рис. 4 для двигуна потужністю 3,7 кВт з моментом інерції $J_1 = 0,02$ кг·м² і приєднаної до нього через пружний вал з коефіцієнтом жорсткості $c_{12} = 100$ Н·м/рад другої зосередженої обертової маси з моментом інерції $J_2 = 0,005$ кг·м² при врахуванні кулонівського тертя з ефектом Штрібека, приведені на рис. 6.

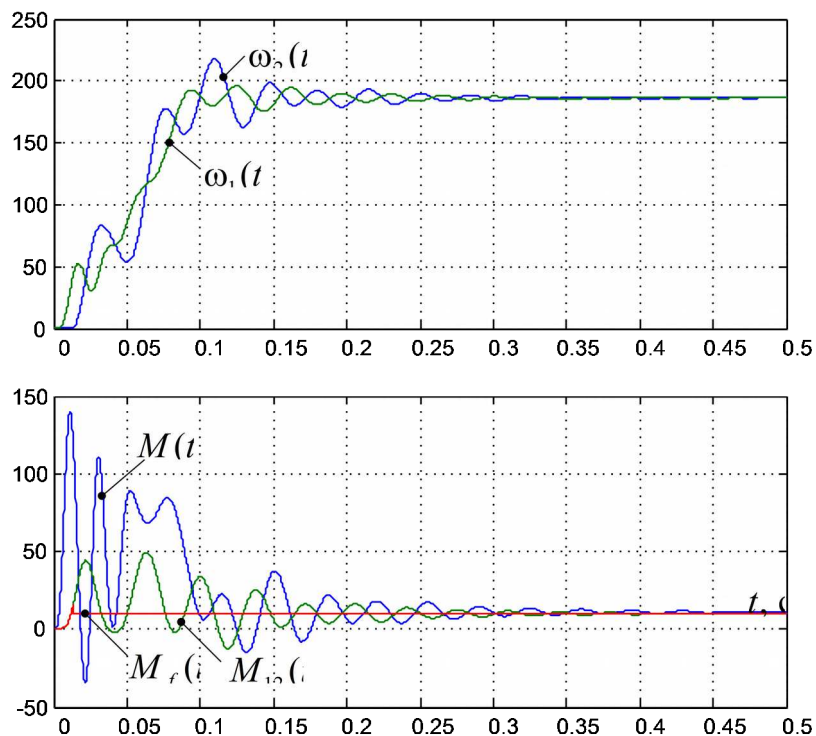


Рис. 6. – Графіки перехідних процесів у моделі двомасового електромеханічного об'єкту рис. 4

Для фіксації вихідних сигналів механічних *SimScape*-блоків у досліджувану модель підключені ідеальні датчики моменту (*Ideal Torque Sensor*) та руху (*Ideal Rotational Motion Sensor*). Усі механічні блоки мають механічні порти, позначені латинськими буквами R і C, причому передача моменту або зусилля здійснюється в напрямку від порту R до порту C. Механічні датчики, крім цих портів, мають ще порти фізичних сигналів, позначені трикутниками та відповідними буквами: T – *torque* (момент), W – *angular velocity* (кутова швидкість), A – *angular displacement* (кутове положення).

Фізичні сигнали після перетворення їх блоками *PS Simulink Converter* бібліотеки *Utilites* додатку *SimPowerSystem* можна використовувати для фіксації результатів засобами *Simulink*.

Ще однією з особливостей використання механічних *SimScape*-блоків є необхідність приєднання хоча б до одного з механічних портів блоку *Solver Configuration* бібліотеки *Utilites*.

В моделі рис. 4 легко рахувати поряд із пружністю кінематичної передачі ефект в'язкого тертя, для чого паралельно до блоку *Rotational Spring* приєднується блок *Rotation Damper*.

Порівняння отриманих графіків перехідних процесів з аналогічними графіками, одержаних при використанні *Simulink*-моделей підтверджують їх тотожність.

Висновки.

1. Доповнення моделей електричних двигунів бібліотеки *SimPowerSystems* пакета *MATLAB* 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 систем електроприводу з роботою двигунів на спільний вал та віртуальні фізичні моделі багатомасових електромеханічних об'єктів.

2. Розглянуті у статті SPS-модель системи «механічний вал», складеної з двох асинхронних двигунів, та *SimScape*-модель двомасової електромеханічної системи на базі асинхронного двигуна «механічний вал» наочно демонструють їх простоту у порівнянні з аналогічними *Simulink*-моделями, і можуть бути рекомендованими для досліджень.

3. На базі запропонованих моделей можна за зразком створювати віртуальні фізичні моделі електромеханічних об'єктів із самими різноманітними кінематичними зв'язками.

Список літератури: 1. Шевченко І.С. Електромеханічні системи в асинхронному електроприводі: [навч. посібник] / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов // Алчевськ: ДонДТУ, 2009. – 349 с. 2. 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. 3. *SimPowerSystems User's Guide*. / Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. – 402 p. 4. Герман-Галкин С.Г. *MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК* / С.Г. Герман-Галкин // СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с. 5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSystems* и *Simulink* / И.В. Черных // М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. – 288 с. 6. Armstrong B., de Wit C.C. *Friction Modeling and Compensation* / B. Armstrong, C.C. de Wit // CRC Press, 1995.

Bibliography (translated): 1. Shevchenko I.S., Morozov D.I. *Electromechanical systems in asynchronous electrodrive*. Alchevsk: DonSTU, 2009. Print. 2. Tolochko, O.I., Chekavskiy H.S. and Miroshnik D.M. «Vector model of induction motor in an environment package *MATLAB*». *Visnyk Kremenych'kogo derzavnogo politehnychnogo universytetu: Naukovi praci KDPU*. 1.2.19 (2003): 199-202. Print. 3. *SimPowerSystems User's Guide*. Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. 4. German-Galkin S.G. *MATLAB & Simulink. Proectirovanie mehatronnyh system na PK*. St. Petersburg: Korona-Vec., 2008. Print. 5. Chernih I.V. *Modelirovanie electrotehnicheskyyh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink*. Moscow: DMK Press, St. Petersburg: Piter, 2008. Print. 6. Armstrong B., de Wit C.C. *Friction Modeling and Compensation*. CRC Press, 1995.

Надійшла (received) 05.06.2015