

УДК 629.421:629.405

М. В. ХВОРОСТ, К. О. СОРОКА, М. І. ШПІКА, А. І. БЕСАРАБ (ХНУМГ)

Кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства  
ім. О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, тел.: (057) 707-32-73,  
ел. пошта: [dekanatn@ksame.kharkov.ua](mailto:dekanatn@ksame.kharkov.ua)

## РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ВИХРОВИХ СТРУМІВ

### Вступ

Основним напрямком вирішення проблеми енергозбереження на електричному транспорті є зменшення втрат у системі керування тяговим електроприводом: двигун – керуючий пристрій. Процеси у цій системі досить складні і їх оптимізація потребує глибокого теоретичного вивчення. Найбільш перспективним методом вивчення є моделювання на основі диференціальних рівнянь.

Як один із засобів моделювання використовується [1] пакет Simulink програмного середовища MatLab. Побудова моделей в цьому пакеті розглянута в ряді робіт і створена велика кількість моделей [1-3]. Проте, для вирішення кожного конкретного завдання придатні тільки ті моделі, які задовольняють вимогам, що витікають з поставлених завдань.

### Постановка задач дослідження

В цій роботі розглянута побудова моделей для вирішення завдань оптимізації системи двигун – пристрій керування з точки зору економії електроенергії транспортними засобами. Метою роботи є розробка моделі електродвигунів тягового приводу з урахуванням вихрових струмів, яка дозволяє провести дослідження властивостей цих двигунів при різних типах систем збудження.

Крім того, додатковою метою роботи є допомога спеціалістам електротранспорту в засвоєнні методів моделювання та використання вже створених моделей у своїй практичній діяльності.

### Основна частина

Найбільш масовим двигуном рухомого складу електротранспорту є двигун послідовного збудження. Перевагою його є великий початковий момент та широкий діапазон регулювання обертового моменту. В трамваях, які експлуатуються, використовується двигун типу ТЕ-022 та його модифікації. Робочий діапазон двигуна знаходиться в межах лінійної ділянки

кривої намагнічування сталі. Розглянемо побудову найпростішої лінійної моделі. Електрична схема заміщення двигуна представлена на рис. 1.

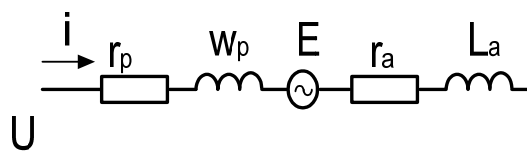


Рис. 1. Електрична схема заміщення двигуна послідовного збудження

Динаміка двигуна описується системою рівнянь (1). Тут прийнято, що індуктивність якоря  $L_a$  постійна і не залежить від величини магнітного потоку.

$$\begin{cases} U = r_p i + r_a i + L_a \frac{di}{dt} + 2 p w_p \xi \frac{d\Phi}{dt} + C\Phi\omega; \\ J \frac{d\omega}{dt} = C\Phi i - M_c; \\ \Phi = k \cdot w_p i. \end{cases} \quad (1)$$

Після підстановки третього рівняння системи в перше та переходу в область зображень, знаходимо

$$i(s) \left( Ts + \frac{r_a + r_p}{r_p} \right) = \frac{1}{r_p} U(s) - \frac{C}{r_p} \Lambda(\Phi\omega), \quad (2)$$

де  $s$  – оператор похідної,  $T = (L_a + L_p) / r_p$ ;

$L_p = 2 p w_p^2 \xi \cdot k$ ;  $\Lambda(\Phi\omega)$  – зображення за Лапласом добутку функцій.

Абзац основного тексту статті з декількох пропозицій.

Відповідно до зауважень [4], рівнянню (2) відповідає фрагмент моделі, який представлений на рис 2, а.

З другого рівняння системи (1) після переходу в область зображень, отримаємо

$$\omega(s) = C \frac{k_w p}{J_s} \Lambda(i^2) - \frac{1}{J_s} M_C(s). \quad (3)$$

В моделі величині  $\Lambda(i^2)$  відповідає величина струму в квадраті, що одержується за допомогою блоку множення. Фрагмент моделі, який відповідає рівнянню (3) представлений на рис. 2, б.

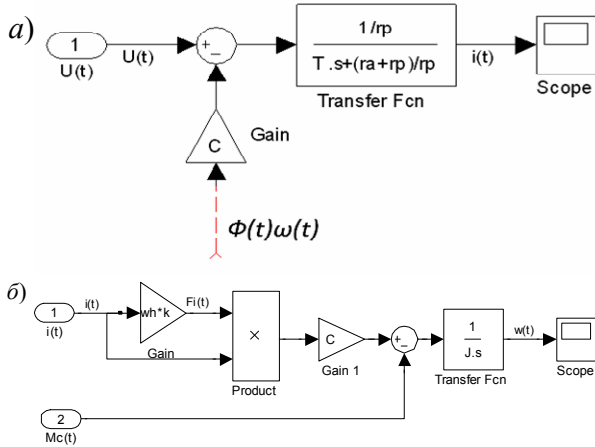


Рис. 2. Фрагменти моделі двигуна послідовного збудження

Шляхом об'єднання фрагментів одержуємо потрібну модель двигуна постійного струму з послідовним збудженням (рис.3).

Підставляючи конкретні значення можна одержати модель конкретного двигуна. На рис. 4 приведено електромеханічні характеристики двигуна ТЕ-022 трамваю, які одержані за розробленою моделлю.

Наступним кроком виконаємо моделювання двигуна змішаного керування з врахуванням вихрових струмів. В електричному транспорті

використовуються двигуни потужністю порядку 100 кВт і більше. Властивістю їх є помітний вплив вихрових струмів на електричні процеси в двигуні. Основну долю складають вихрові струми в масивній станині [5].

Вихрові струми можна розрахувати з рівнянь Максвелла для електромагнітного поля згідно закону електромагнітної індукції [6]:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (4)$$

Рівняння визначає електричне поле, яке виникає при зміні індукції магнітного поля. Це електричне поле викликати вихрові струми. Їх величина визначається формулою (5), де  $r$  – питома провідність,

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{r}. \quad (5)$$

Оскільки станина виконана з суцільного металу, вихрові струми сусідніх контурів складаються, і утворюється тільки один контур струму  $L$ , який охоплює весь поперечний розріз станини. Для розрахунку величини струму вздовж контуру  $L$  можна скористатись рівнянням електромагнітної індукції в інтегральній формі:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (6)$$

а величина вихрового струму буде рівна сумарній електрорушійній силі, поділений на опір  $R_L$  контуру  $L$ ,

$$i_L = \frac{1}{R_L} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік двигуна.

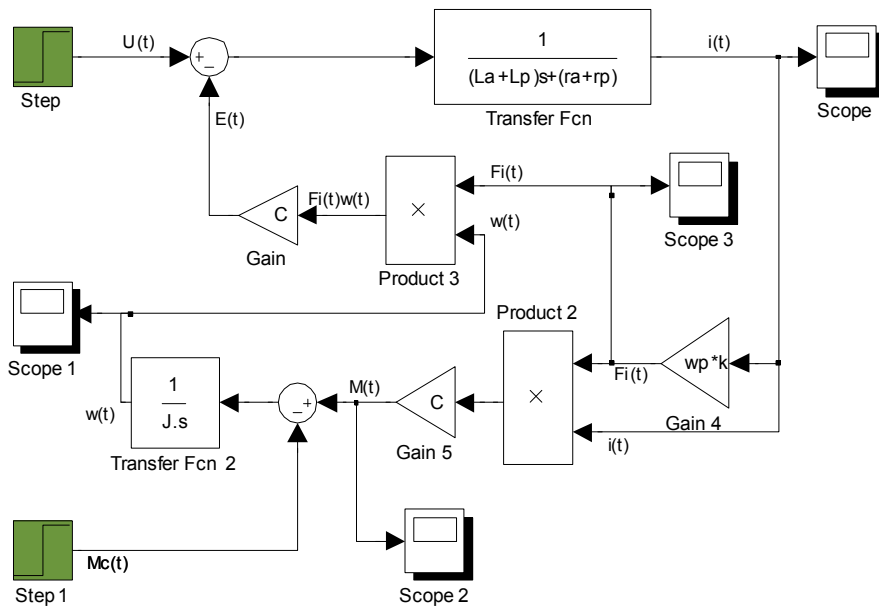


Рис. 3. Модель двигуна постійного струму послідовного збудження

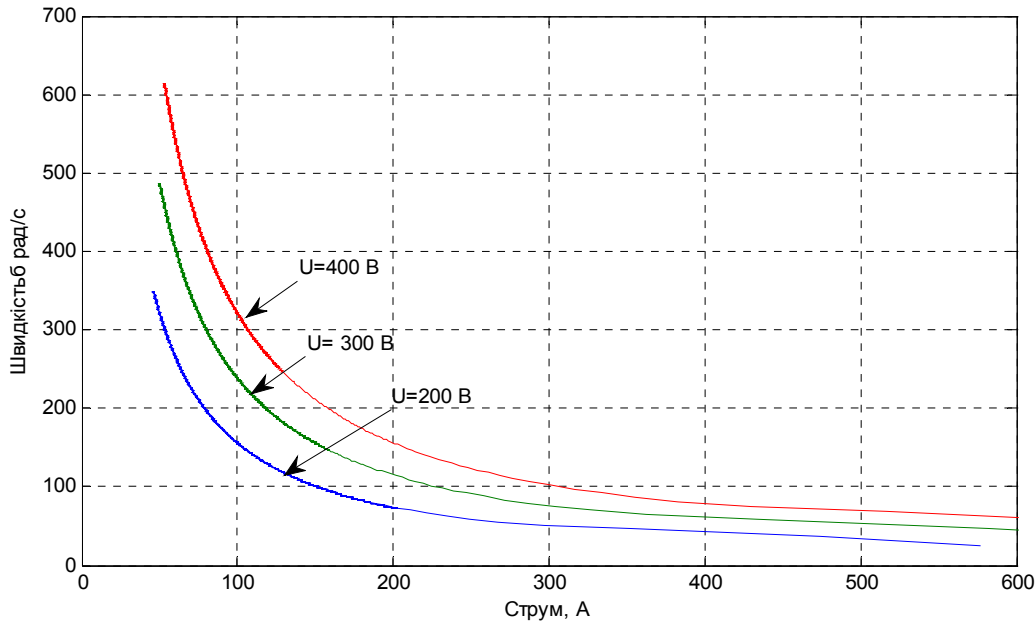


Рис. 4. Електромеханічні характеристики двигуна GE-022

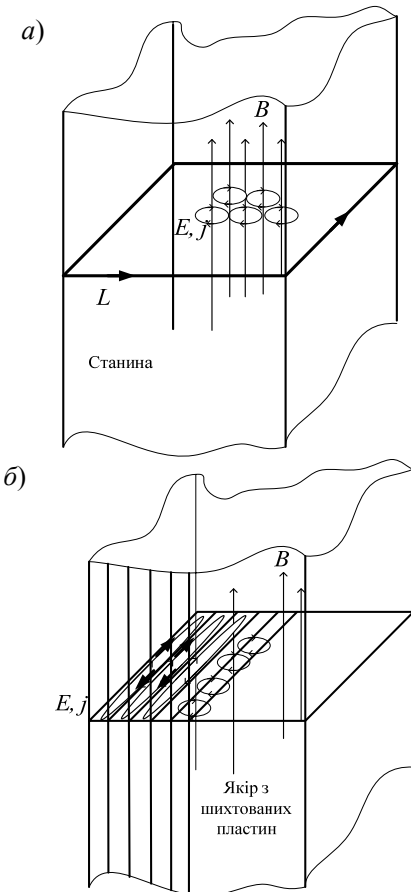


Рис. 5. Схема вихрових струмів у станині і у шихтованому якорі двигуна

Магнітний потік у станині двигуна пульсуючий, тобто основна частина – постійний магнітний потік двигуна. Додаткові складові зумовлені перехідними процесами під час пуску та зміни зовнішнього навантаження; впливом якоря та його комутації колектором.

Магнітний потік якоря змінюється в результаті перемагнічування під час комутації. Закон, яким можна наближено описати цю зміну, має вигляд

$$\Phi_{\text{я}}(t) = \Phi(t) \sin(\omega t) . \quad (8)$$

Зміну магнітного потоку якоря (8) наближено описано у вигляді синусоїди, хоча конструкція сучасних двигунів забезпечує магнітний потік, який має вигляд трапецій з різким переходом під час комутації і майже постійною величиною після комутації [5]. Оскільки якорь двигунів постійного струму, як правило, шихтований, то вихрові струми зосереджуються в окремих пластинах якоря, весь контурний вихровий струм розбивається на струми в окремих пластинах. Величина цих струмів незначна і в багатьох випадках не враховується [6].

При моделюванні двигуна прийнято спрощену модель [1], коли враховуються тільки вихрові струми в станині, як струми додаткової обмотки  $w_k$  з одним витком. Параметром цієї обмотки є постійна часу  $T_k$ . Схема заміщення двигуна з врахуванням вихрових струмів приведена на рис. 6.

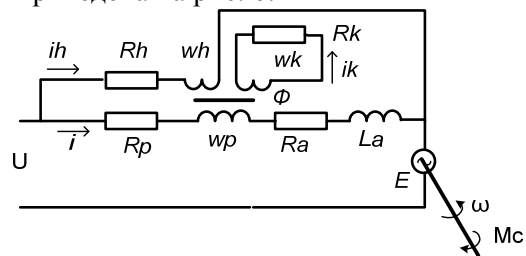


Рис. 6. Електрична схема заміщення двигуна постійного струму змішаного збудження

$$\left\{ \begin{aligned} U &= i r_a + i r_p + L_a \frac{di}{dt} + 2 p w_p \xi \frac{di}{dt} + E; \\ U &= r_h i_h + 2 p w_h \xi \frac{di_h}{dt}; \\ 2 p w_k \xi \frac{di_k}{dt} &= i_k \cdot r_k; \\ F &= i + i_h - i_k; \\ E &= C \Phi \omega; \\ M &= C \Phi i; \\ \Phi &= f(F); \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Система рівнянь (9) описує роботу двигуна змішаного збудження з урахуванням вихрових струмів

Модель двигуна, що відповідає цій системі рівнянь приведена на рис. 7.

**Висновки**

Одержані моделі дозволяють моделювати електродвигуни постійного струму різних типів збудження під час вирішення завдань енергозбереження тягових електроприводів рухомого складу електротранспорту, що експлуатуються в наш час.

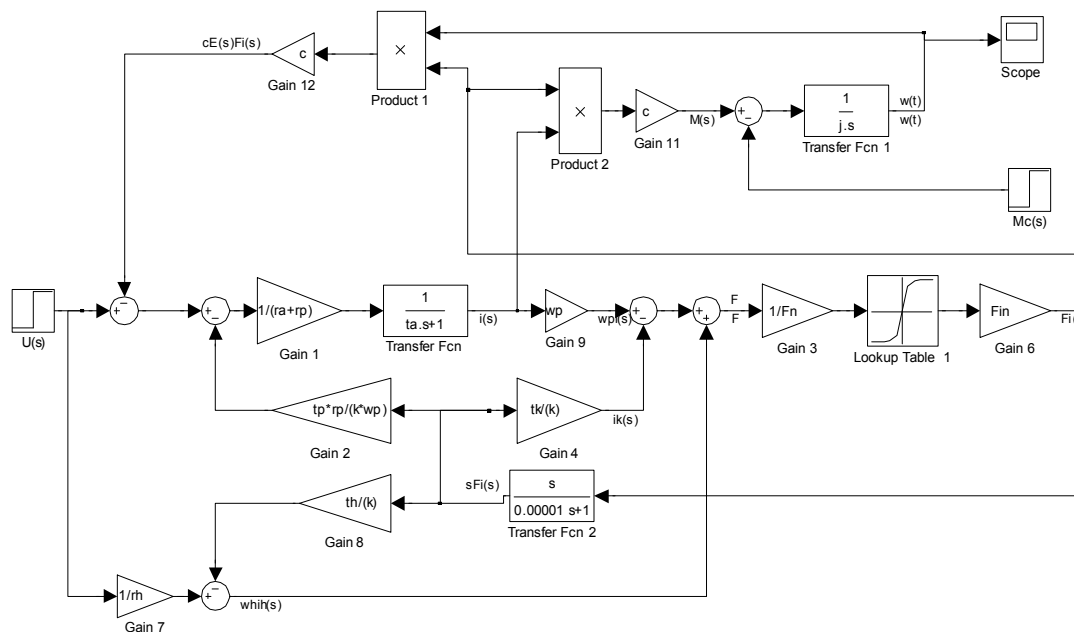


Рис. 7. Модель двигуна постійного струму змішаного збудження з врахуванням нелінійної залежності магнітного потоку та впливу вихрових струмів в станині

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Костюк Л. Д та ін. Моделювання електроприводів. – Львів: Львівська політехніка, 2004. – 404 с.
2. Черных И. В. SimPowerSystems. Моделирование электромеханических устройств и систем в Simulink / И. В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
3. Сорока К.О., До питання розробки моделей електродвигунів тягового електроприводу транспортних засобів / К. О. Сорока, Н. В. Хворост, А. І. Бесараб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5(8). - С. 45-49.
4. Шевченко В. П. Машины змінного струму / В. П. Шевченко, Белікова Л. Я. – Одеса: Наука і техніка 2005. – 272 с.
5. Дмитриевский В. А Исследование индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом на основе теории поля и теории цепей: специальность автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. - Екатеринбург, 2007. – 18 с.
6. Копылов И. П. Математическое моделирова-

**REFERENCES**

1. Kosteyk L.D. I dr. Modeleyvannia elektroprivodiv. [Modeling of electric drives] – Lviv: Lvivska politexnika, 2004, 404 p.
2. Chernix I.V. SimPowerSystems Modelirovanie elektromexanicheskix ustroystv i sistem v Simulink [Modeling of electromechanical devices and systems in Simulink]. Saint Petersburg, Piter print Publ., 2008, 288 p
3. Soroka K.O., Xvorost N. V., Besarab A.I. Do pitannia rozrobki modeley elektrodviguniv tiagovogo elektroprivodu transportnix zasobiv. [To the question of developing models of electric traction electric drive means of transport] Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2013, no. 5(8), pp. 45-49.
4. Shevchenko V.P., Belikova L.Y. Mashini zminnogo strumu. [Machines AC] Odessa: Nauka I texnika 2005, 272 p.
5. Dmitrievskiy V.A. Issltdovanie indukcionnix mashin s razomknutim magnitoprovodom na osnove teorii pola I teorii cepey: specialnost avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk. [Investigation of of induction ma-

ние электрических машин / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

chines with open magnetic circuit on the basis of field theory and circuit theory]. Ekaterenburg, 2007, 18 p.

6. Kopilov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskix mashin. [Mathematical modeling of electrical machines] – М.: Vissh.sh., 2001, 327 p.

Надійшла до друку 27.10.2014.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

Розглянуто питання моделювання тягових електродвигунів в пакеті Simulink. Показана процедура переходу від математичних рівнянь, що описують модель, до імітаційної моделі у системі Matlab, що дозволить отримувати будь-які характеристики ще на етапі розробки.

Запропоновані моделі двигунів постійного струму послідовного та змішаного збудження, особливістю яких є врахування реальних кривих намагнічування. Отримана модель тягового двигуна може бути використана для проведення оптимізації режимів роботи тягового електроприводу з точки зору енергозбереження, оскільки враховує параметри на які може оказувати вплив система керування.

Розроблена модель двигуна постійного струму змішаного збудження з врахуванням нелінійної залежності магнітного потоку та впливу вихрових струмів в станині дозволяє кількісно оцінити рівень додаткових втрат у магнітній системі електричної машини.

**Ключові слова:** тяговий електропривод, модель, MatLab, Simulink, двигун постійного струму, потокозчеплення, обертовий момент, вихрові струми.

**УДК 629.421:629.405**

**М. В. ХВОРОСТ, К. А. СОРОКА, Н. И. ШПИКА, А. И. БЕСАРАБ (ХНУГХ)**

Кафедра электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, тел.: (057) 707-32-73, эл. почта: [dekanatzn@ksame.kharkov.ua](mailto:dekanatzn@ksame.kharkov.ua)

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Рассмотрены вопросы моделирования тяговых двигателей при помощи пакета Simulink. Показана процедура перехода от математических уравнений, которые описывают модель, к имитационной модели в системе Matlab, что позволит построить любые характеристики еще на этапе разработки.

Предложены модели двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения, особенною которых является учет реальных кривых намагничивания. Полученная модель тягового двигателя может быть использована для проведения оптимизации режимов работы тягового электропривода с энергосберегающей точки зрения, поскольку учитывает параметры, на которые может оказывать влияние система управления.

Разработанная модель двигателя постоянного тока смешанного возбуждения с учетом нелинейной зависимости магнитного потока и с учетом влияния вихревых токов в станине позволяет количественно оценить уровень дополнительных потерь в магнитной системе электрической машины.

**Ключевые слова:** тяговый электропривод, модель, MatLab, Simulink, двигатель постоянного тока, потокозчепление, вращающий момент, вихревые токи.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Саєнко Ю. Л.*

**UDC 629.421:629.405**

**M. V. KHVOROST, K. O. SOROKA, N. V. SHPIKA, A. I. BESARAB (NUUEK)**

Department of electrical transport, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002, tel.: (057) 707-32-73, e-mail: [dekanatzn@ksame.kharkov.ua](mailto:dekanatzn@ksame.kharkov.ua)

## DEVELOPMENT THE MODELS OF ELECTRIC MACHINES FOR TRACTION ELECTRIC DRIVE OF THE TRANSPORT VEHICLES INCLUDING EDDY CURRENTS

Considered questions of modeling the traction motors by using Simulink. Showed the transition procedure from mathematical equations, which describe the model, to the imitation model in Matlab system, that will allow to build any characteristics only at the development stage.

Offered the models of DC electric machines with series field excitation and compound field excitation, the feature of which is account of real magnetization curves. Received model of electric motor can be use to carry out an optimization of the work modes of traction electric drive from the energy-saving point of view, because that model accounts a parameters on which a control system can influence.

Developed model of DC electric machines with compound field excitation with accounting a non-linear dependence magnetic flux and with column's eddy currents including allows to evaluate an auxiliary loses level in magnetic system of electric machine.

**Keywords:** traction electric drive, model, MatLab, Simulink, DC electric machine, magnetic flux linkage, torque, eddy current.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

© Хворост М. В. та ін., 2014