

МОДЕЛЬ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано математичну модель двигуна постійного струму змішаного збудження, у якого обмотка паралельного збудження увімкнена паралельно якорю, що дозволить підвищити достовірність опису електромеханічних процесів у двигуні. Розроблено комп'ютерну модель двигуна в ППП Matlab Simulink, що розширює сферу використання Matlab для електроприводів на базі двигуна змішаного збудження.

Ключові слова: двигун постійного струму, змішане збудження, математична модель, структурна схема, комп'ютерна модель.

Вступ

Ідентифікація електромеханічних систем дозволяє спрогнозувати перебіг електромагнітних та механічних процесів у них. Серед електромеханічних систем широкого використання в електро-транспорті набув такий об'єкт як двигун постійного струму змішаного збудження (ДПСЗЗ). Відомі моделі ДПСЗЗ, які враховують розміщення шунтувальної обмотки збудження паралельно до напруги живлення двигуна [1; 2]. Такі моделі досить просто моделювати, оскільки обмотка збудження та обмотка якоря по напрузі незалежні. Але існують літературні джерела, у яких шунтувальна обмотка збудження розміщена паралельно до кола якоря [3].

Метою роботи є підвищення достовірності опису електромеханічних процесів в ДПСЗЗ у математичному та комп'ютерному моделюваннях, а також розширення сфери застосування ППП Matlab для систем, які мають ДПСЗЗ.

Результати дослідження

Побудуємо схему заміщення ДПСЗЗ (рис. 1).

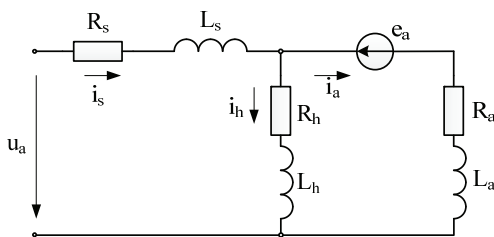


Рис. 1. Схема заміщення ДПСЗЗ

На рис. 1 позначено: R_s , L_s — активний опір та індуктивність обмотки послідовного збудження; R_h , L_h — активний опір та індуктивність обмотки паралельного збудження; R_a , L_a — активний опір та індуктивність обмотки якоря; i_s , i_h , i_a — струми відповідно обмотки послідовного збудження, обмотки паралельного збудження та кола якоря; u_a , e_a — напруга живлення та електрорушійна сила двигуна.

Для випадку, коли двигун має компенсаційну обмотку, додаткові полюса, опір та індуктивність кола якоря дорівнюватимуть сумі активних опорів та індуктивностей компенсаційної обмотки, додаткових полюсів та якоря.

За відомих параметрів машини невідомими будуть струми i_s , i_h , i_a .

За другим законом Кірхгофа для контура, який містить послідовну та паралельну обмотки збудження, отримаємо [1, 2, 5]

$$u_a(t) = R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} + R_h i_h(t) + L_h \frac{di_h(t)}{dt}. \quad (1)$$

За другим законом Кірхгофа для контура, який містить паралельну обмотку збудження та обмотку якоря, отримаємо:

$$0 = e_a(t) + R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} - R_h i_h(t) - L_h \frac{di_h(t)}{dt}. \quad (2)$$

За першим законом Кірхгофа

$$i_s(t) = i_a(t) + i_h(t). \quad (3)$$

Застосувавши до цих виразів перетворення Лапласа, отримаємо систему трьох рівнянь

$$\begin{cases} u_a(p) = R_s i_s(p) + L_s p i_s(p) + R_h i_h(p) + L_h p i_h(p); \\ 0 = e_a(p) + R_a i_a(p) + L_a p i_a(p) - R_h i_h(p) - L_h p i_h(p); \\ i_s(p) = i_a(p) + i_h(p). \end{cases} \quad (4)$$

Додамо перші два рівняння:

$$u_a(p) - e_a(p) = R_s i_s(p) + L_s p i_s(p) + R_a i_a(p) + L_a p i_a(p); \quad (5)$$

$$u_a(p) - e_a(p) = R_s \left(1 + \frac{L_s}{R_s} p\right) i_s(p) + R_a \left(1 + \frac{L_a}{R_a} p\right) i_a(p). \quad (6)$$

Враховувавши те, що

$$\frac{L_s}{R_s} = T_s; \quad (7)$$

$$\frac{L_a}{R_a} = T_a, \quad (8)$$

де T_s — постійна часу послідовної обмотки збудження; T_a — електромагнітна стала часу двигуна; отримаємо:

$$i_a(p) = \frac{1/R_a}{1 + T_a p} (u_a(p) - e_a(p)) - \frac{R_s(1 + T_s p)}{R_a(1 + T_a p)} i_s(p). \quad (9)$$

З третього рівняння системи (4) отримаємо:

$$i_a(p) = i_s(p) - i_h(p). \quad (10)$$

Підставимо (10) у (5). Отримаємо:

$$u_a(p) - e_a(p) = R_s i_s(p) + L_s p i_s(p) + R_a (i_s(p) - i_h(p)) + L_a p (i_s(p) - i_h(p)); \quad (11)$$

$$u_a(p) - e_a(p) = (R_s + R_a) i_s(p) + (L_s + L_a) p i_s(p) - R_a i_h(p) - L_a p i_h(p); \quad (12)$$

$$u_a(p) - e_a(p) = (R_s + R_a) \left(1 + \frac{L_s + L_a}{R_s + R_a} p\right) i_s(p) - R_a \left(1 + \frac{L_a}{R_a} p\right) i_h(p). \quad (13)$$

Позначимо

$$R_s + R_a = R_{sa}; \quad (14)$$

$$\frac{L_s + L_a}{R_s + R_a} = T_{sa}. \quad (15)$$

Вираз (13) з урахуванням (8), (14) та (15) запишеться так:

$$u_a(p) - e_a(p) = R_{sa} (1 + T_{sa} p) i_s(p) - R_a (1 + T_a p) i_h(p); \quad (16)$$

$$i_s(p) = \frac{1/R_{sa}}{1 + T_{sa} p} (u_a(p) - e_a(p)) + \frac{R_a (1 + T_a p)}{R_{sa} (1 + T_{sa} p)} i_h(p). \quad (17)$$

Розглянемо друге рівняння системи (4).

$$R_h \left(1 + \frac{L_h}{R_h} p\right) i_h(p) = e_a(p) + R_a \left(1 + \frac{L_a}{R_a} p\right) i_a(p). \quad (18)$$

Враховуючи (8) та те, що

$$\frac{L_h}{R_h} = T_h, \quad (19)$$

де T_h — постійна часу паралельної обмотки збудження, отримаємо:

$$i_h(p) = \frac{1/R_h}{1+T_h p} e_a(p) + \frac{R_a(1+T_a p)}{R_h(1+T_h p)} i_a(p). \quad (20)$$

Електрорушійна сила двигуна розраховується за виразом

$$e_a(p) = kf(p) \cdot \omega(p), \quad (21)$$

де $kf(p)$ — загальний магнітний потік машини, виражений в просторі Лапласа; $\omega(p)$ — швидкість обертання якоря двигуна.

Загальний магнітний потік двигуна постійного струму змішаного збудження складається з суми магнітних потоків, які створюються послідовною та паралельною обмотками збудження.

Відповідно до [1] паралельна обмотка збудження створює 81,5 % загального магнітного потоку, а послідовна — 18,5 %. У [6] автор зазначає: «Складовою потоку, утвореного незалежною обмоткою... є незмінною, як і у двигунів незалежного збудження. Тому для $i_a = 0$ (режим ідеального неробочого ходу) потік двигуна визначається незалежною — Φ_n , і для режиму двигуна становить (0,7...0,8) Φ_n . Отже, частка потоку послідовної обмотки становить (0,2...0,3) від загального...». Якщо розглядати перехідний режим роботи, під час якого струм якоря двигуна може перевищувати номінальний у 2,5 рази, то крива намагнічування послідовної обмотки збудження буде переходити у зону насичення. Тобто суттєві коливання струму якоря двигуна не приведуть до суттєвих коливань намагнічувальної сили послідовної обмотки збудження. Таким чином отримаємо

$$kf(p) = 0,185 \cdot kf_s(p) + 0,815 \cdot kf_h(p), \quad (22)$$

де $kf_s(p)$ — магнітний потік, який створює послідовна обмотка збудження; $kf_h(p)$ — магнітний потік, який створює паралельна обмотка збудження.

Відомо, що криву намагнічування машини постійного струму можна представити поліномом четвертого порядку [1]. Для моделювання скористаємося представленням кривої намагнічування у вигляді поліному четвертого порядку. Таке представлення має найменшу помилку (0,0083557) та найвищий коефіцієнт кореляції (0,9999179) [1].

$$kf_s^*(p) = a_s + b_s i_s^*(p) + c_s i_s^{*2}(p) + d_s i_s^{*3}(p) + e_s i_s^{*4}(p); \quad (23)$$

$$kf_h^*(p) = a_h + b_h i_h^*(p) + c_h i_h^{*2}(p) + d_h i_h^{*3}(p) + e_h i_h^{*4}(p), \quad (24)$$

де $kf_s^*(p)$ — відносне значення магнітного потоку, який створюється послідовною обмоткою збудження; $kf_h^*(p)$ — відносне значення магнітного потоку, який створюється паралельною обмоткою збудження; i_s^* , i_h^* — відносні значення відповідно струмів послідовної та паралельної обмоток;

a_s, b_s, c_s, d_s, e_s — коефіцієнти апроксимації кривої намагнічування послідовної обмотки збудження; a_h, b_h, c_h, d_h, e_h — коефіцієнти апроксимації кривої намагнічування паралельної обмотки збудження.

Відносні значення магнітних потоків

$$kf_s^*(p) = \frac{kf_s(p)}{KF_{\text{НОМ}}}; \quad kf_h^*(p) = \frac{kf_h(p)}{KF_{\text{НОМ}}}, \quad (25)$$

де $KF_{\text{НОМ}}$ — номінальне значення загального магнітного потоку.

Номінальне значення загального магнітного потоку можна знайти з виразу (9) для номінального режиму роботи. Для того, щоб визначити номінальне значення електрорушійної сили, запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для контуру, який містить послідовну обмотку збудження та коло якоря (див. рис. 1):

$$u_a(t) = R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} + e_a(t) + R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt}. \quad (26)$$

Для усталеного (номінального) режиму роботи похідні за струмами будуть дорівнювати нулю, тоді електрорушійна сила

$$E_{a, \text{НОМ}} = U_{a, \text{НОМ}} - R_s i_{s, \text{НОМ}} - R_a i_{a, \text{НОМ}} \quad (27)$$

Номінальне значення магнітного потоку буде дорівнювати

$$KF_{\text{НОМ}} = \frac{E_{a, \text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{a, \text{НОМ}} - R_s i_{s, \text{НОМ}} - R_a i_{a, \text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} \quad (28)$$

Відносні значення струмів збудження

$$i_s^*(p) = \frac{1}{I_{s, \text{НОМ}}} i_s(p); \quad i_h^*(p) = \frac{1}{I_{h, \text{НОМ}}} i_h(p), \quad (29)$$

де $I_{s, \text{НОМ}}$ — номінальне значення струму обмотки послідовного збудження; $I_{h, \text{НОМ}}$ — номінальне значення струму обмотки паралельного збудження.

Момент, який розвиває двигун постійного струму, розраховується за формулою

$$m(p) = kf(p) \cdot i_a(p). \quad (30)$$

Запишемо основне рівняння руху

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = m(t) - m_c(t), \quad (31)$$

де J — момент інерції якоря двигуна; $m_c(t)$ — момент навантаження двигуна.

Виконавши над рівнянням (31) перетворення Лапласа, отримаємо:

$$Jp\omega(p) = m(p) - m_c(p), \quad (32)$$

звідки швидкість обертання двигуна

$$\omega(p) = \frac{1}{Jp} (m(p) - m_c(p)). \quad (33)$$

За отриманими залежностями побудуємо структурну схему двигуна. При цьому на вхід схеми подається напруга живлення та момент навантаження. Структурна схема зображена на рис. 2.

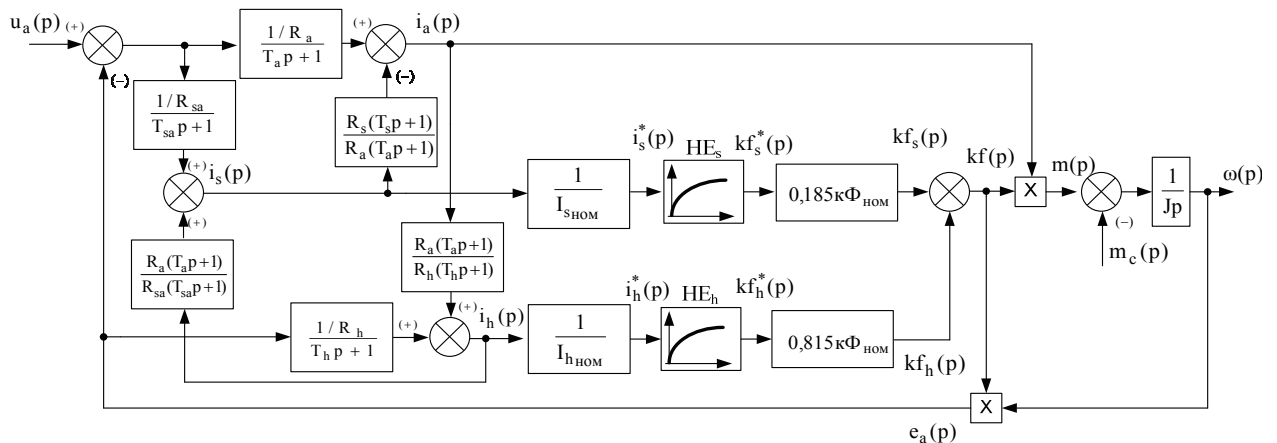


Рис. 2. Структурна схема двигуна постійного струму змішаного збудження

На рис. 2 позначено: HE_s — нелінійний елемент, який відтворює криву намагнічування струму послідовної обмотки збудження, HE_h — нелінійний елемент, який відтворює криву намагнічування струму паралельної обмотки збудження.

За структурною схемою ДПС 33 можна побудувати комп'ютерну модель та отримати графіки перехідних процесів по швидкості, струму та моменті двигуна. Розглянемо двигун постійного струму змішаного збудження П11 з паспортними даними:

- номінальна напруга живлення $U_{a, \text{НОМ}} = 220$ В;
- номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 3000$ об/хв.;
- номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 700$ Вт.;
- номінальний струм двигуна $I_{s, \text{НОМ}} = 4,3$ А;

- момент інерції якоря двигуна $J = 0,0003 \text{ кгм}^2$;
- активний опір кола якоря $R_{\text{я}} = 3,56 \text{ Ом}$;
- активний опір додаткових полюсів $R_{\text{дп}} = 1,06 \text{ Ом}$;
- активний опір послідовної обмотки збудження $R_s = 0,15 \text{ Ом}$;
- активний опір паралельної обмотки збудження $R_h = 695 \text{ Ом}$.

Для розрахунків приймемо що постійна часу послідовної обмотки дорівнює постійній часу кола якоря. Відповідно до [1] постійна часу кола якоря двигуна $T_a = 0,006 \text{ с}$, а постійна часу паралельної обмотки збудження $T_h = 0,03 \text{ с}$.

Виконавши всі необхідні розрахунки, побудуємо в ППП Matlab Simulink комп'ютерну модель двигуна постійного струму змішаного збудження. Комп'ютерна модель зображена на рис. 3.

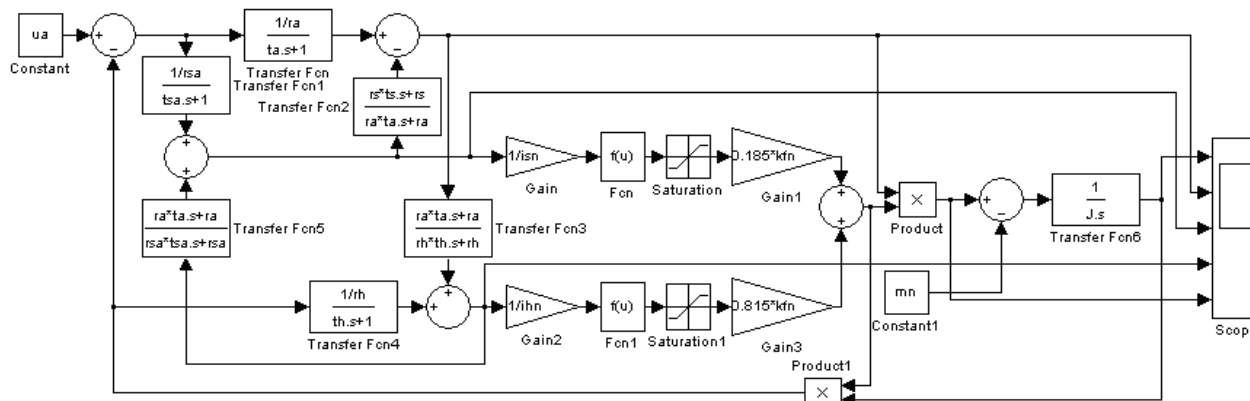


Рис. 3. Комп'ютерна модель двигуна постійного струму змішаного збудження

В результаті моделювання отримано графіки перехідних процесів швидкості обертання, струму якоря, струму послідовної та паралельної обмоток і моменту двигуна (рис. 4).

Розрахункові співвідношення показані на рис. 5.

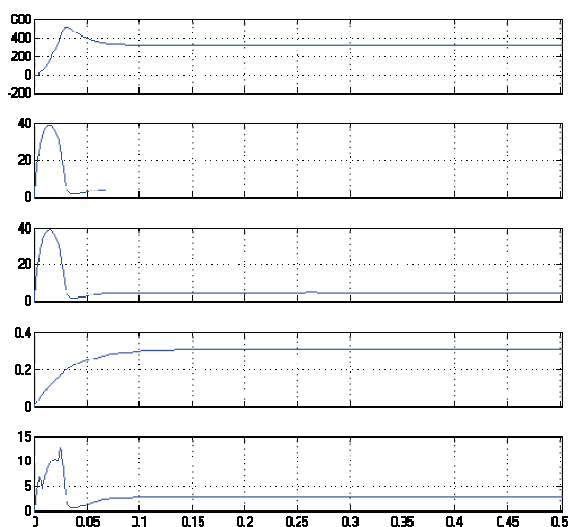


Рис. 4. Графіки перехідних процесів відповідно швидкості обертання, струму якоря, струму послідовної обмотки, струму паралельної обмотки, моменту двигуна при запуску на номінальне навантаження

```

Command History
File Edit View Web Window Help
ua=220
nn=3000
pn=0.7
ian=4.3
J=0.0003
ra=3.56+1.06
rs=0.15
rh=695
ta=0.006
ts=0.006
th=0.03
rsa=rs+ra
ls=ts*rs
la=ta*ra
tsa=(ls+la)/rsa
mn=kfn*ian
ihn=ua/rh
isn=ihn+ian
kfn=(ua-isn*rs-ian*ra)/(0.1047*nn)

```

Рис. 5. Розрахункові співвідношення ДПС 33 у Matlab

Для створення вбудованої моделі ДПС 33 у Matlab 6.5 потрібно входи та виходи побудованої комп'ютерної моделі позначити елементами «In» та «Out», відповідно (рис. 6)

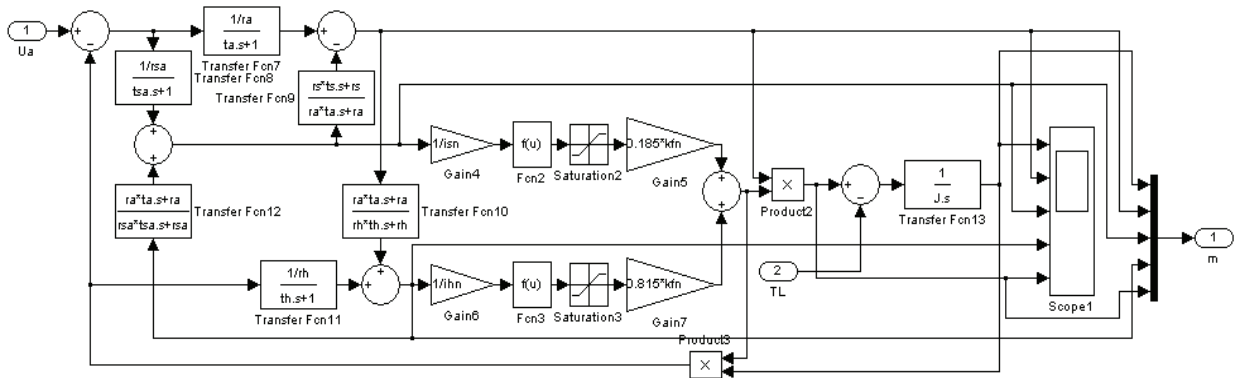


Рис. 6. Заміна входів та виходів комп'ютерної моделі на елементи «In» та «Out»

Як входні та вихідні параметри моделі позначено: U_a — напруга живлення двигуна; T_L — навантаження на двигун; m — вектор п'яти вихідних параметрів, а саме: швидкості обертання, струму якоря, струму збудження послідовної обмотки, струму збудження паралельної обмотки та моменту двигуна.

Для створення вбудованої моделі у Matlab на підсистему, у якій знаходиться модель, потрібно «накласти маску». Виділивши модель та вибравши операцію Create SubSystem, можна створити підсистему на основі виділеної області (рис. 7).

Маскування виконується вибором над підсистемою операції «Mask SubSystem». Під час маскування можна задати графічне оформлення блока підсистеми, опис змінних та самого блока, перейменувати входи-виходи підсистеми тощо.

Виконавши маскування, отримаємо вбудовану модель ДПС 33 (див. рис. 8).



Рис. 7. Підсистема на основі моделі ДПС 33

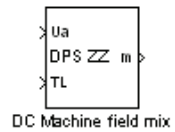


Рис. 8. Замаскована модель ДПС 33

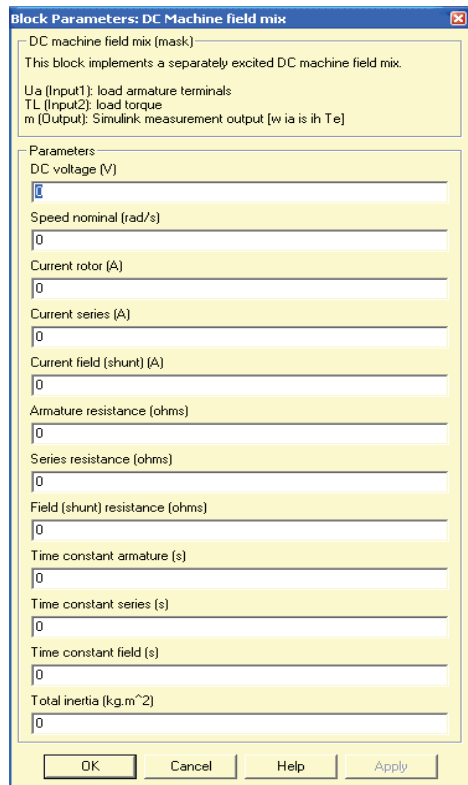


Рис. 9. Параметри маскованої моделі ДПС 33

Якщо відкрити параметри замаскованої моделі двигуна, отримаємо вікно, у якому можна ввести параметри двигуна (рис. 9). Підставивши параметри двигуна у «замасковану» модель, отримаємо такі ж самі графіки, які отримували раніше (рис. 10).

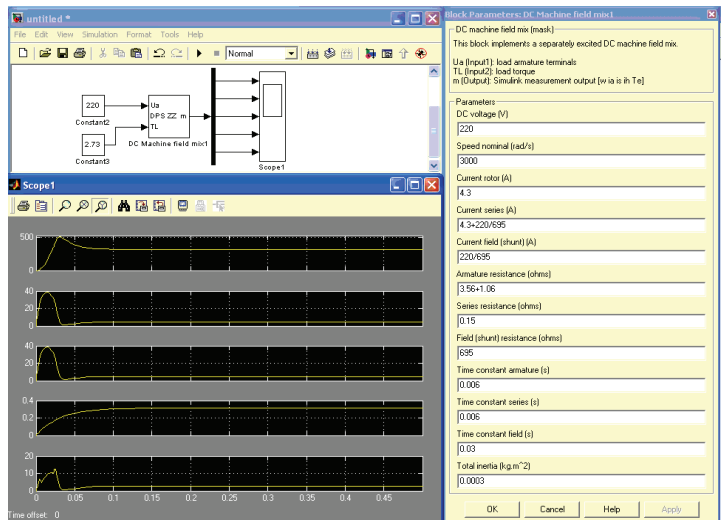


Рис. 10. Результати моделювання маскованої моделі ДПС 33

Висновки

1. Побудовано комп'ютерну модель двигуна постійного струму змішаного збудження, яка враховує те, що паралельна обмотка збудження підключена паралельно до кола якоря;
2. Отримана комп'ютерна модель, на відміну від вбудованих у Matlab моделей, дозволяє оцінити процеси, що відбуваються у двигуні постійного струму саме змішаного збудження;
3. Модель двигуна не дозволяє промоделювати його роботу у разі реверсу;
4. Отримані результати можуть використовуватися під час виконання наукових досліджень та лабораторних робіт з курсів «Моделювання електромеханічних систем», «Проектування систем автоматизованого електроприводу», «Системи керування електроприводами» тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моделювання електромеханічних систем : підруч. / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. — Кременчук, 2001. — 410 с. — ISBN 966-95391-3-7.
2. Вольдек А. И. Электрические машины : учеб. для студ. высш. техн. заведений / А. И. Вольдек. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Л. : Энергия, 1974. — 840 с. с ил.
3. Типовой электропривод промышленных установок / С. А. Волотковский, В. И. Емец, В. К. Козло и др. ; под общ. ред. С. А. Волотковского. — К.: «Вища школа», 1983. — 307 с.
4. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. — М. : ДМК Пресс; СПб. : Питер, 2008. — 288 с. — ISBN 978-5-388-00020-0.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 07.03.2014

Мошнориз Микола Миколайович — канд. техн. наук, доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: moshnoriz@gmail.com;

Лобатюк Юрій Анатолійович — аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

M. M. Moshnoriz¹
Yu. A. Lobatiuk¹

Model of engine of direct-current of the mixed excitation

¹Vinnitsia National Technical University

The mathematical model of engine of direct-current of the mixed excitation, at which the puttee of parallel excitation is included in parallel to the anchor that will allow promoting authenticity of description of electromechanics processes in an engine, is offered in the paper. The computer model of engine is developed in Matlab Simulink, that extends the sphere of the use of Matlab for electromechanics on the base of engine of the mixed excitation.

Keywords: engine of direct-current, mixed excitation, mathematical model, flow diagram, computer model.

Moshnoriz Mykola M. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electromechanics Systems of Automation in Industry on Transport, e-mail: moshnoriz@gmail.com;

Lobatiuk Yurii A. — Post-Graduate Student of the Chair of Renewable Energy and Transport of Electric Systems and Complexes

М. М. Мошнориз¹
Ю. А. Лобатюк¹

Модель двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

¹Вінницький національний технічний університет

Предложена математическая модель двигателя постоянного тока смешанного возбуждения, у которого обмотка параллельного возбуждения включена параллельно якорю, что позволит повысить достоверность описания электромеханических процессов в двигателе. Разработана компьютерная модель двигателя в ППП Matlab Simulink, что расширяет сферу использования Matlab для электроприводов на базе двигателя смешанного возбуждения.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, смешанное возбуждение, математическая модель, структурная схема, компьютерная модель.

Мошнориз Николай Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: moshnoriz@gmail.com;

Лобатюк Юрий Анатоліевич — аспірант кафедри відновлюваної енергетики і транспортних електричних систем і комплексів.