

УДК 621.316.7

І. В. САВЕЛЕНКО

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Розроблено структурну схему системи автоматичного керування тяговим електроприводом на основі синхронного двигуна з постійними магнітами, застосування якої дозволяє керувати рухом контактних електровозів, а також досліджено якість роботи запропонованої системи шляхом математичного моделювання в середовищі Simulink.

Ключові слова: система автоматичного керування, релейні регулятори, контактні електровози, синхронні двигуни з постійними магнітами.

Вступ. На сучасному етапі розвитку мікропроцесорних систем керування стало можливим використання їх застосування для керування в тягових електроприводах. Як відомо, тягові електроприводи пред'являють завищені вимоги до масогабаритних та енергетичних характеристик електричних двигунів, в якості яких можуть використовуватися синхронні двигуни на постійних магнітах (СДПМ). Розробка систем автоматичного керування для СДПМ дозволяє забезпечити широкі діапазони регулювання швидкості обертання, покращення їх енергетичних, статичних і динамічних показників.

Постановка задачі. Класичні методи синтезу систем автоматичного керування (САК) електроприводів не в повній мірі враховують можливості покращення статичних та динамічних характеристик високоефективних електроприводів на основі СДПМ. Одним із шляхів покращення техніко-економічних показників тягових електроприводів на основі СДПМ є удосконалення їх САК.

Аналіз публікацій. В роботі [1] розроблено математична модель електроприводу з СДПМ в основу якої покладено математичний апарат теорії оптимального керування [2]. В роботі [3] проведено синтез систем автоматичного керування електроприводом з СДПМ та отримані закони оптимального регулювання для релейних регуляторів струмів та швидкості обертання. Проте, для САК з релейними регуляторами, що працюють за критерієм узагальненої роботи на основі використання властивостей функцій перемикання необхідно на основі запропонованої в [1] математичної моделі управління провести розробку структурної схеми САК тяговим електроприводом з СДПМ, а також дослідити якість роботи розробленої САК.

Мета статті. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління тяговим електроприводом, що забезпечує високі динамічні та статичні характеристики.

Основна частина. В роботі [1] сформульовано математичну модель керування рухом тягового електроприводу на базі СДПМ:

Для аналізу режимів роботи СДПМ найбільш зручно використовувати рівняння динаміки, записані в рухомій системі координат, пов'язаній з ротором СДПМ (d-q координати). Система рівнянь, що описує

динаміку руху електроприводу з СДПМ має вигляд:

$$\begin{cases} u_d = p\psi_d + i_d r_s - \omega_R \psi_q; \\ u_q = p\psi_q + i_q r_s + \omega_R \psi_d; \\ \psi_d = x_d i_d + x_{dm} I_{m0}; \\ \psi_q = x_q i_q; \\ H p \omega_R = \psi_d i_q - \psi_q i_d - M_3; \\ I_{m0} = const. \end{cases}, \quad (1)$$

де u_d, u_q – складові напруги обмоток статора по осям d, q, В;

i_d, i_q – складові струму обмоток статора по осям d, q, А;

ψ_d, ψ_q – складові потокозчеплення обмоток статора по осям d, q, В·с;

$p = d/dt$ – оператор диференціювання;

r_s – опір фази статора, Ом;

x_d, x_q – складові індуктивні опори обмоток статора по осям d, q, Ом;

M_3 – зовнішній момент на валу СДПМ;

ω_R – швидкість обертання ротору.

Аналіз математичних моделей електроприводів дає змогу стверджувати, що з достатньою точністю їх можна записати у вигляді лінійного диференційного рівняння [4]:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + f(t); \\ Y(t) = CX(t) + v(t), \end{cases}, \quad (2)$$

де X – вектор станів системи;

U – вектор сигналів керування;

A – матриця станів;

B – матриця керування.

C – матриця вихідних сигналів.

Після алгебраїчних перетворень рівняння (1) прийме вид:

$$\begin{cases} u_d = x_d p i_d + i_d r_s + f_1; \\ u_q = x_q p i_q + i_q r_s + \omega_R x_{dm} I_{m0} + f_2; \\ H p \omega_R = x_{dm} I_{m0} i_q + f_3. \end{cases}, \quad (3)$$

Враховуючи введені позначення в [3] введемо нові змінні:

$$\eta_1 = I_d = i_d - i_d^*; \quad \eta_2 = I_q = i_q - i_q^*; \quad \eta_3 = \Omega_R = \omega_R - \omega_R^*,$$

$$U_1 = u_d - u_d^*, \quad U_2 = u_q - u_q^*.$$

Система диференціальних рівнянь руху тягового електроприводу прийме вигляд:

$$\begin{cases} U_1 = \eta_1(r_s + p x_d); \\ U_2 = \eta_2(r_s + p x_q) + \eta_3 x_{dm} I_{m0}; \\ 0 = \eta_2 x_{dm} I_{m0} - \eta_3 p J. \end{cases} \quad (4)$$

Проаналізувавши вигляд системи рівнянь (4) можна побачити, що перше рівняння лінійно незалежне від двох останніх. Зважаючи на це, в процесі аналізу режимів роботи СДПМ без урахування пускових обмоток, як і в попередньому випадку, можна розглядати два незалежні канали по осях d і q .

Після алгебраїчних перетворень систему рівнянь для контурів d і q , згідно рівняння (2) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} p\eta_1 = -\frac{r_s}{x_d}\eta_1 + \frac{1}{x_d}U_1 = A_d\eta_1 + B_dU_1 \\ p\eta_2 = -\frac{r_s}{x_q}\eta_2 - \frac{x_{dm}I_{m0}}{x_q}\eta_3 + \frac{1}{x_q}U_2; \\ p\eta_3 = \frac{x_{dm}I_{m0}}{J}\eta_2. \end{cases} \quad (5)$$

Звідки можна визначити, можна визначити матриці стану A_d і керування B_d системи, що описують динаміку процесів системи СДПМ для вісі d .

Згідно з методикою, приведеної в роботі [3] можна виконати синтез регуляторів струму i_d , i_q та швидкості ω_R . Після проведення синтезу регуляторів для САК тягового електроприводу з СДПМ можна визначити закони оптимального регулювання струмів i_d та i_q та швидкості обертання ω_R .

При стабілізації струмів у заданих межах релейні регулятори, що працюють в ковзному режимі, забезпечать при цьому нескінченно велике значення коефіцієнту підсилення прямого каналу контуру регулювання. Це дозволить повністю компенсувати вплив проти е.р.с. двигуна на точність стабілізації струмів і виключити вплив інтегральних складових.

Таким чином, алгоритм оптимального регулювання струму по вісі q для СДПМ має такий кінцевий вигляд:

$$u_{iq} = u_{ym} \operatorname{sign}(i_q^* - i_q) = 220 \operatorname{sign}(i_q^* - i_q), \quad (6)$$

де u_{ym} – вектор керування струмом.

Алгоритм оптимального регулювання рівняння регулятора швидкості СДПМ має вигляд:

$$u_{\omega} = u_{yom} \operatorname{sign}\left(\omega^* - \omega - p \frac{x_q}{r_s} \omega\right), \quad (7)$$

де u_{yom} – вектор керування швидкості

Алгоритм оптимального релейного регулювання струму по вісі d для СДПМ має вигляд:

$$u_{id} = u_{ym} \operatorname{sign}(i_d^* - i_d) = -220 \operatorname{sign}(i_d), \quad (8)$$

Алгоритми оптимального керування (6), (8) реалізуються з допомогою жорстких зворотних зв'язків в функції основних змінних, а алгоритм (7) – в функції основної змінної та її першої похідної. Усі змінні алгоритмів керування (6), (7) та (8) піддаються безпосередньому вимірюванню, тому структурна реалізація цих алгоритмів не викликає принципових

труднощів. Структурна схема системи оптимального керування електроприводом на основі СДПМ без пускових обмоток, що реалізує алгоритми оптимального керування (6), (7) та (8), зображена на рис. 1.

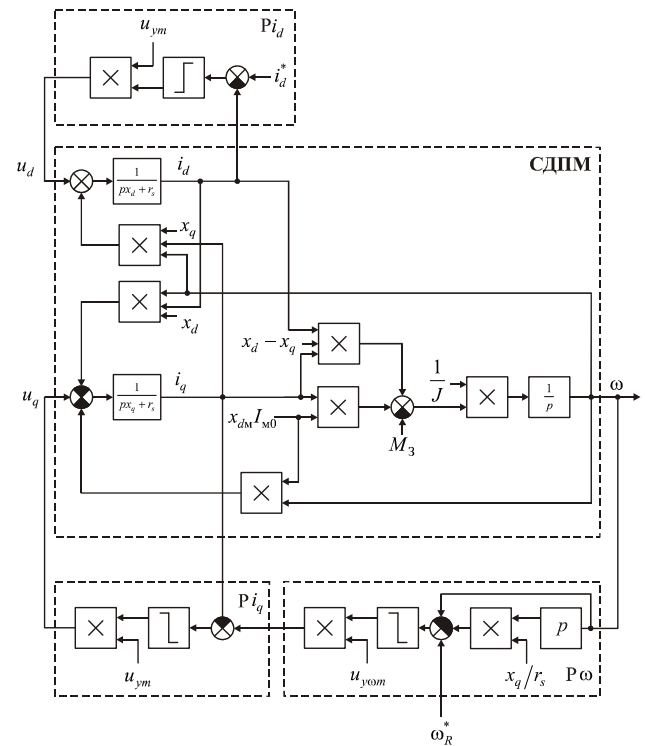


Рис. 1 – Структурна схема САК електроприводом на основі СДПМ: Pi_d – регулятор струму по вісі d ; Pi_q – регулятор струму по вісі q ; $P\omega$ – регулятор швидкості обертання ротору

На рис. 1: представлена структурна схема СДПМ, що відповідає системі рівнянь (1);

Pi_d – структурна схема регулятора струму i_d , що відповідає закону керування (8);

Pi_q – структурна схема регулятора струму i_q , що відповідає закону керування (6);

$P\omega$ – структурна схема регулятора швидкості обертання ротора СДПМ, що відповідає закону керування (7).

Для дослідження якості роботи запропонованої САК було проведено математичне моделювання в середовищі Simulink. Узагальнена модель Simulink регулювання напруги приведена на рис. 2.

Загальна модель САК електроприводом на основі СДПМ без пускових обмоток складається з таких основних блоків:

- "SDPM" – модель СДПМ без пускових обмоток;
- "Red id" – модель регулятора струму i_d , що відповідає закону керування (2.67);
- "Red iq" – модель регулятора струму i_q , що відповідає закону керування (6);
- "Red w" – модель регулятора швидкості обертання ротора СДПМ, що відповідає закону керування (7);

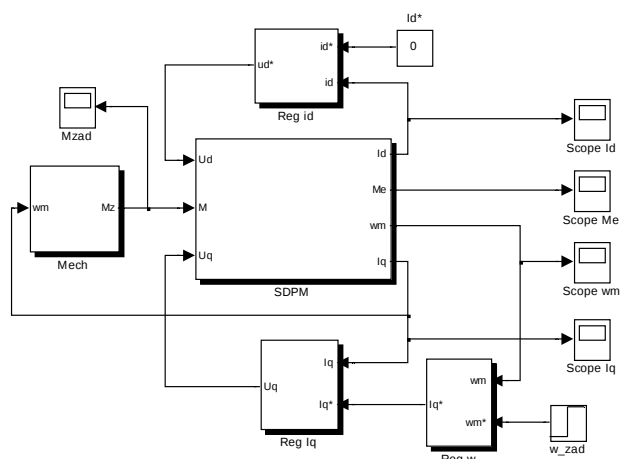


Рис. 2 – Загальна комп'ютерна модель САК електроприводом на основі СДПМ.

- "w_zad" – блок задання швидкості обертання ротора СДПМ;
- "M_zad" – блок задання механічного моменту навантаження.
- "Mech" – модель динаміки руху електровоза.

На рис. 3 наведена комп'ютерна модель СДПМ.

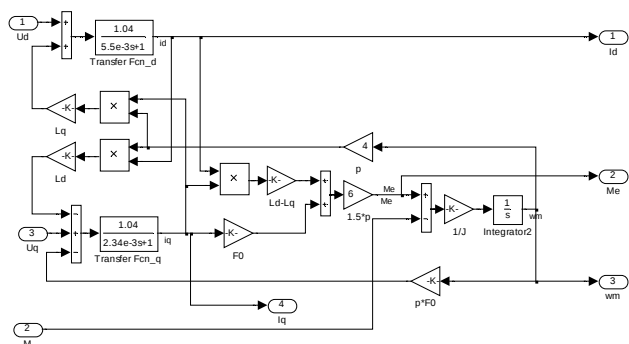
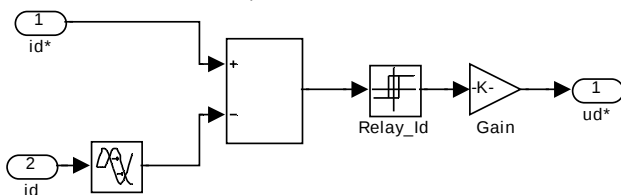
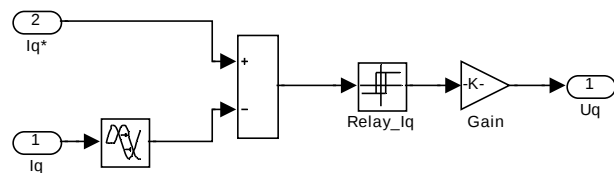


Рис. 3 – Комп'ютерна модель СДПМ.

На рис. 4 наведена комп'ютерна модель регулятора струму i_d .

Рис. 4 – Комп'ютерна модель регулятора струму i_d .

На рис. 5 наведена комп'ютерна модель регулятора струму i_q .

Рис. 5 – Комп'ютерна модель регулятора струму i_q .

На рис. 6 наведена комп'ютерна модель регулятора швидкості ω_R .

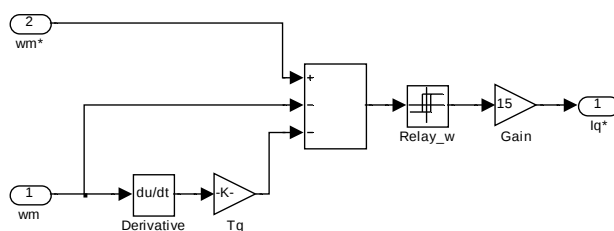


Рис. 6 – Комп'ютерна модель регулятора швидкості.

Для визначення ефекту від застосування законів керування (6)–(8), скористаємось розробленими комп'ютерними моделями САК електроприводом на основі СДПМ.

Комп'ютерне моделювання роботи САК електроприводом проводилось для двох випадків:

- для базової моделі САК електроприводом з лінійними регуляторами струму та швидкості (див. рис.7);

- для розробленої в роботі моделі САК електроприводом з релейними регуляторами струму та швидкості (рис. 2).

Розроблені комп'ютерні моделі дозволяють розраховувати та запам'ятовувати значення параметрів режиму електроприводу на основі СДПМ, що дало змогу провести їх подальшу обробку та представити їх у графічному виді.

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК електроприводом на основі СДПМ без пускових обмоток наведені у вигляді графіків на рис. 8 – 9.

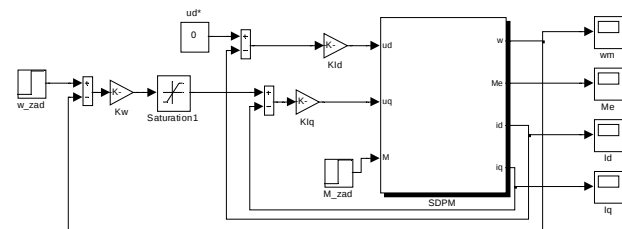


Рис. 7 – Базова модель СДПМ.

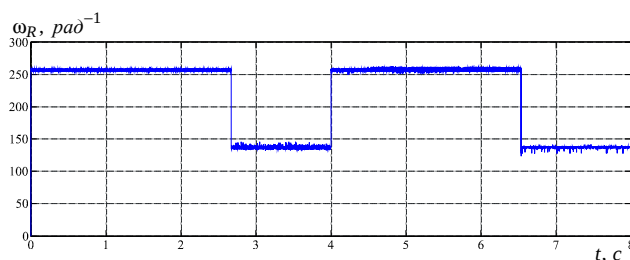


Рис. 8 – Графік зміни моменту для розробленої моделі САК

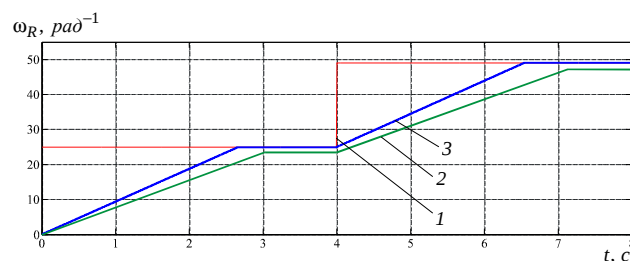


Рис. 9 – Графік зміни моменту для розробленої та базової моделі САК: 1 – заданий сигнал; 2 – сигнал базової моделі; 3 – сигнал розробленої системи

Як видно з рис. 9 тривалість перехідного процесу зміни швидкості у випадку запропонованої в роботі моделі виявилась на 14 % (0,4 с) меншою, ніж для базової моделі. До того ж, як видно з рис. 9 розроблена система, на відміну від базової, володіє астатизмом відносно моменту навантаження.

Висновки. Підсумовуючи вище зазначене можливо зробити наступні висновки:

1. Розроблені на основі знайдених оптимальних релейних законів керування структурні схеми САК дозволяють створити комп'ютерні імітаційні моделі, які дають змогу проводити аналіз роботи запропонованих САК електроприводом на основі СДПМ.

2. Результати математичного моделювання показали, що запропонована САК більш ефективна за рахунок зменшення тривалості перехідного процесу у випадку СДПМ та володіють астатизмом відносно зовнішнього моменту навантаження тягової установки.

Список літератури: 1. Плішков П. Г. Математичні моделі синхронних двигунів на постійних магнітах для синтезу систем

автоматичного керування високоефективними електроприводами/ П. Г. Плішков, І. В. Савеленко, А. В. Некрасов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (92) - С. 26-34. 2. Терехов В. М. Системи управління електроприводом/ В. М. Терехов, О. І. Осипов/ под ред. В. М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 301 с. 3. Савеленко І. В. Синтез системи автоматичного керування електроприводом на базі синхронного двигуна з постійними магнітами / І. В. Савеленко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. праць. – Кіровоград, 2015. – №28. – С. 309–316.

Bibliography (transliterated): 1. Plieskov P. H. Matematychni modeli synkhronnykh dvyhuniv na postiiynykh mahnitakh dlia syntezy system avtomatychnoho keruvannia vysokoefektyvnymy elektropriyvodamy. P.H. Plieskov, I.V. Savelenko, A.V. Nekrasov. Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. Kremenchuk: KrNU, 2015. Vol. 3/2015 (92). 26-34. Print. 2. Terekhov V.M. Systemy upravleniya elektropriyvodov. V.M. Terekhov, O.I. Osipov. pod red. V.M. Terekhova. – Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. – 301 p. Print. 3. Savelenko I.V. Syntez systemy avtomatychnoho keruvannia elektropriyvidom na bazi synkhronnoho dvyhuna z postiiinymy mahnitamy. I.V. Savelenko. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: Zb. nauk. prats. Kirovohrad, 2015. Vol. 28. 309–316. Print.

Надійшла (received) 09.10.2015



Савеленко Іван Володимирович – викладач кафедри "Електротехнічних систем та енергетичного менеджменту", Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград
Savelenko Ivan Volodymyrivych – lecturer in "Electrical systems and energy management", Kirovograd National Technical University. Kirovograd