

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БЕЗКОЛЕКТРНИМ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ ПРИВОДУ КОЛЕС ЕЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДУ

Крупенко О.Ф., студент, Толочко О.І., д.т.н., проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Стрімке поширення електротранспортних засобів різного призначення та з різними технічними характеристиками в нашому житті призводить до застосування різноманітних систем електроприводу. Для електромобілів великої та середньої потужності зазвичай застосовують асинхронні двигуни (*IM – Induction Motor*) та синхронні двигуни з постійними магнітами, вбудованими в середину ротора (*IPMSM – Interior Permanent Magnets Motor*), а для транспортних засобів малої потужності (велосипеди, скутери, гіроборди, моноколеса тощо) – більш дешеві синхронні двигуни з поверхневими постійними магнітами (*SPMSM – Surface Permanent Magnets Motor*) та колекторні і безколекторні двигуни постійного струму (*DCM – DC Motor* і *BDCM – Brushless DC Motor*). *BDCM* уявляють собою *PMSM* з трапецеїдальною електрорушійною силою (ЕРС) на відміну від *IPMSM* і *SPMSM*, що мають синусоїдальну ЕРС. *BDCM* у порівнянні з *PMSM* мають менш стабільний крутний момент, але й меншу вартість. На базі *BDCM* виготовляють найдешевші мотор-колеса для електровелосипедів. Для високої енергоефективності електричних транспортних засобів треба синтезувати відповідні алгоритми керування. Дослідження та вдосконалення систем керування електроприводами електротранспортних засобів є актуальною науково-технічною та інженерною задачею. На першому етапі такі дослідження зазвичай виконують методом математичного моделювання.

Мета роботи. Розробка моделі системи керування *BDCM* у складі системи електроприводу велосипеда та перевірка її адекватності.

Матеріали і результати досліджень.

BDCM, як усі *PMSM*, використовують укупі з датчиком положення ротора (резольвер, енкодер тощо) та перетворювачем частоти (ПЧ). Зазвичай для моделювання таких об'єктів застосовують пакет структурного математичного моделювання *Simulink*, проте в даній статті розглядаються дослідження у середовищі платформи для віртуального фізичного моделювання електронних схем *PLECS*, яке є більш зручним для створення моделей електронних пристроїв взагалі та перетворювачів частоти зокрема і забезпечує більшу швидкість моделювання, ніж *Simulink*, при врахуванні дискретних та нелінійних властивостей ПЧ.

Складемо математичний опис *BDCM* за еквівалентною схемою, поданою на рис.1. Припустимо, що $R_a = R_b = R_c = R$ і $L_a = L_b = L_c = L$ завдяки симетрії трифазного двигуна [1, 2].

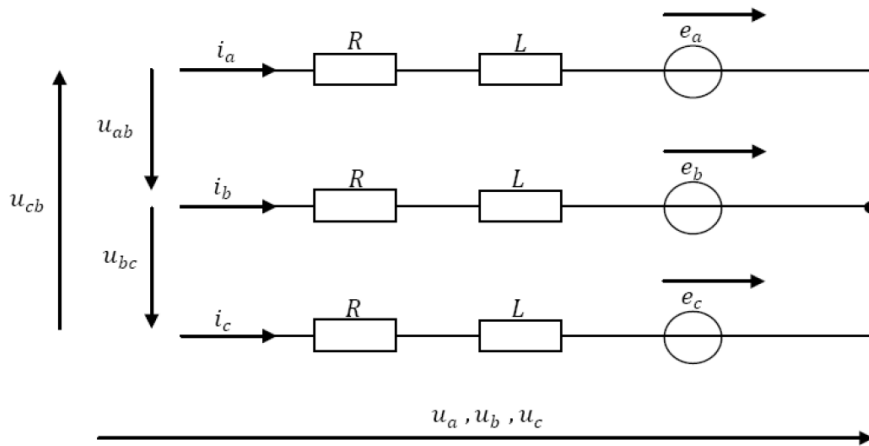


Рисунок 1 – Еквівалентна схема безколекторного двигуна постійного струму зі з'єднанням обмоток статора в зірку

У відповідності з представленою еквівалентною схемою напишемо рівняння лінійних напруг двигуна за другим законом Кірхгофа у вигляді:

$$\begin{aligned}
 U_{ab} &= R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b, \\
 U_{bc} &= R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c, \\
 U_{ca} &= R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $e_{a,b,c}$ – проти-ЕРС, $i_{a,b,c}$ – струми якоря, що протікають через обмотки, $U_{a,b,c}$ – фазні напруги, $U_{ab,bc,ca}$ – лінійні напруги.

Відношення між фазними струмами двигуна для з'єднання в зірку описується виразом:

$$i_a + i_b + i_c = 0. \tag{2}$$

Оскільки кожна з напруг є лінійною комбінацією двох інших, то для опису об'єкта керування достатньо двох рівнянь. Використовуючи рівняння (1) та (2), перепишемо систему рівнянь лінійних напруг у вигляді:

$$\begin{aligned}
 U_{ab} &= R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b, \\
 U_{bc} &= R(i_a + 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a + 2i_b) + e_b - e_c.
 \end{aligned} \tag{3}$$

У відповідності з другим законом руху Ньютона відношення між електромагнітним моментом T_e і швидкістю мотора ω_m має вигляд:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega_m}{dt}, \quad \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}. \tag{4}$$

де T_l – навантаження в Нм, J – Момент інерції в $\text{кг} / \text{м}^2$.

Проти-ЕРС та електромагнітний момент можна виразити через наведену далі систему рівнянь.

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e), e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right), e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right). \quad (5)$$

Результуючий електромагнітний момент безколекторного двигуна постійного набуде вигляду:

$$T_e = \frac{k_t}{2} \left[i_a F(\theta_e) + i_b F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \right]. \quad (6)$$

В рівнянні (6) введені наступні позначення: k_e і k_t константи проти-ЕРС та електромагнітного моменту відповідно. Електричний кут θ_e дорівнює механічному куту θ_m двигуна, помноженого на кількість пар полюсів $\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$. Функція $F(\theta)$ – це функція положення ротора, що дає трапецієподібну форму сигналу проти-ЕРС. Один період її зміни можна представити як

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right), & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1, & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ 1 + \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right), & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases}$$

Структура моделюючої програми, яка дозволяє досліджувати електромеханічну систему транспортного засобу на базі BDCM, показана на рис. 2.

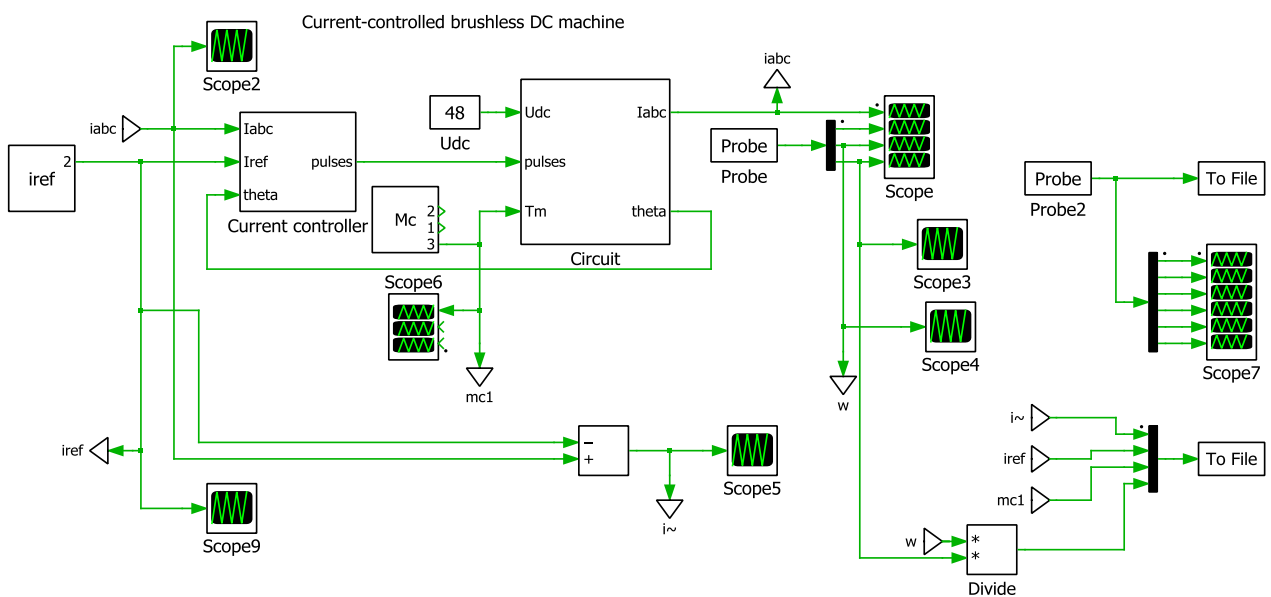


Рисунок 2 – Структура моделюючої програми в середовищі PLECS

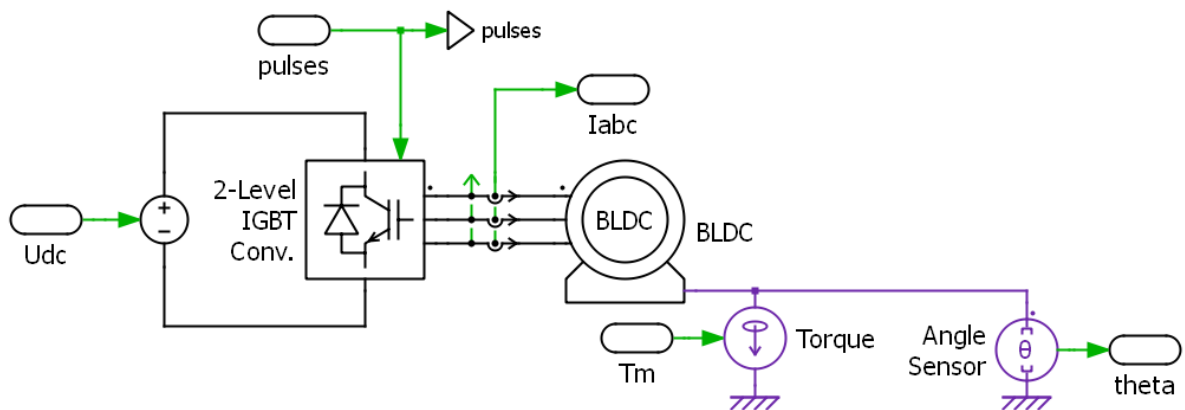


Рисунок 3 – Модель BDCM з ПЧ

Модель на рис. 3 складається з моделі BDCM, яка була математично описана вище та блоку дворівневого інвертора.

В якості приводного двигуна ЕМС використано BDCM (ME0201013001) «Mars Electric LLC» з параметрами наведеними в табл. 1 [3].

Таблиця 1 – Параметри двигуна (ME0201013001)

Опір фази статора, R	0.013 Ом
Індуктивність фази, L	0.00006 Гн
Момент інерції, J	0.005 кг / м ²
Потужність, P	1 кВт
Номінальна напруга, U	48 В
Номінальний струм, I	250 А
Номінальний обертовий момент $M_{ном}$	35 Нм
Моментна стала K_t	0.1364 Нм/А
Стала проти-ЕРС K_e	0.0325 В·с

Як відомо, задачею керування вихідних координат в електротранспорті є відпрацювання заданого профілю моменту двигуна. Дослідження розробленої ЕМС проводились саме в зазначених умовах. При цьому необхідно гарантувати величину заданого прискорення.

Система керування була протестована при двох значеннях заданого моменту двигуна $M_{ном}$, $0.5M_{ном}$, при цьому заданий момент формувався не стрибкоподібно, а лінійно наростав до заданих значень з обмеженим прискоренням при русі.

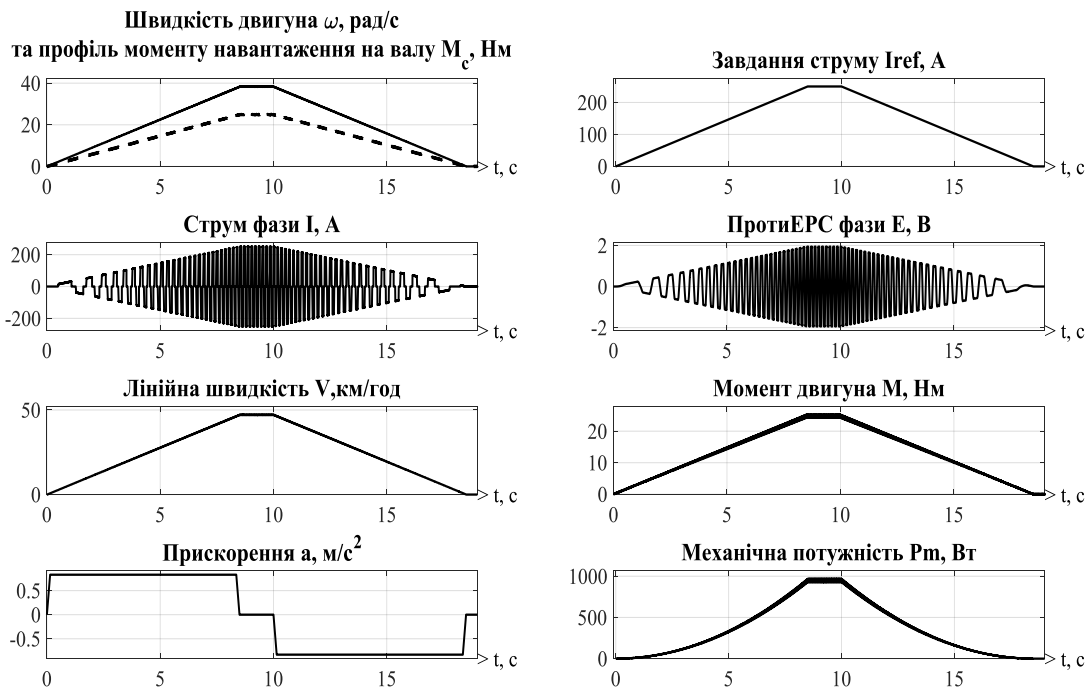


Рисунок 4 – Перехідні процеси в системі при відпрацюванні заданої траєкторії моменту обмеженої на номінальному значенні $M_{ном}$

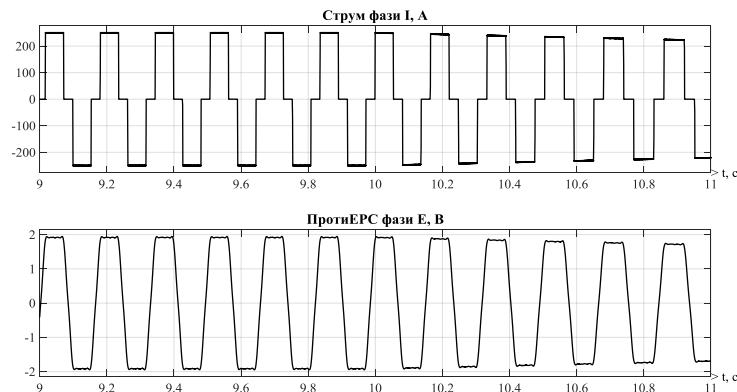


Рисунок 5 – Фрагмент перехідного процесу на ділянці усталеного режиму при $M_{ном}$

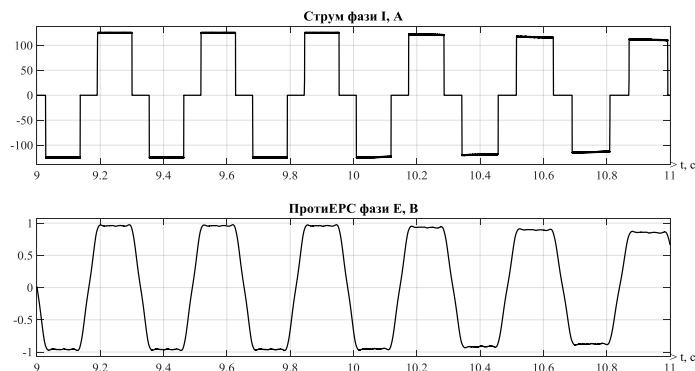


Рисунок 6 – Фрагмент перехідного процесу на ділянці усталеного режиму при $0.5M_{ном}$

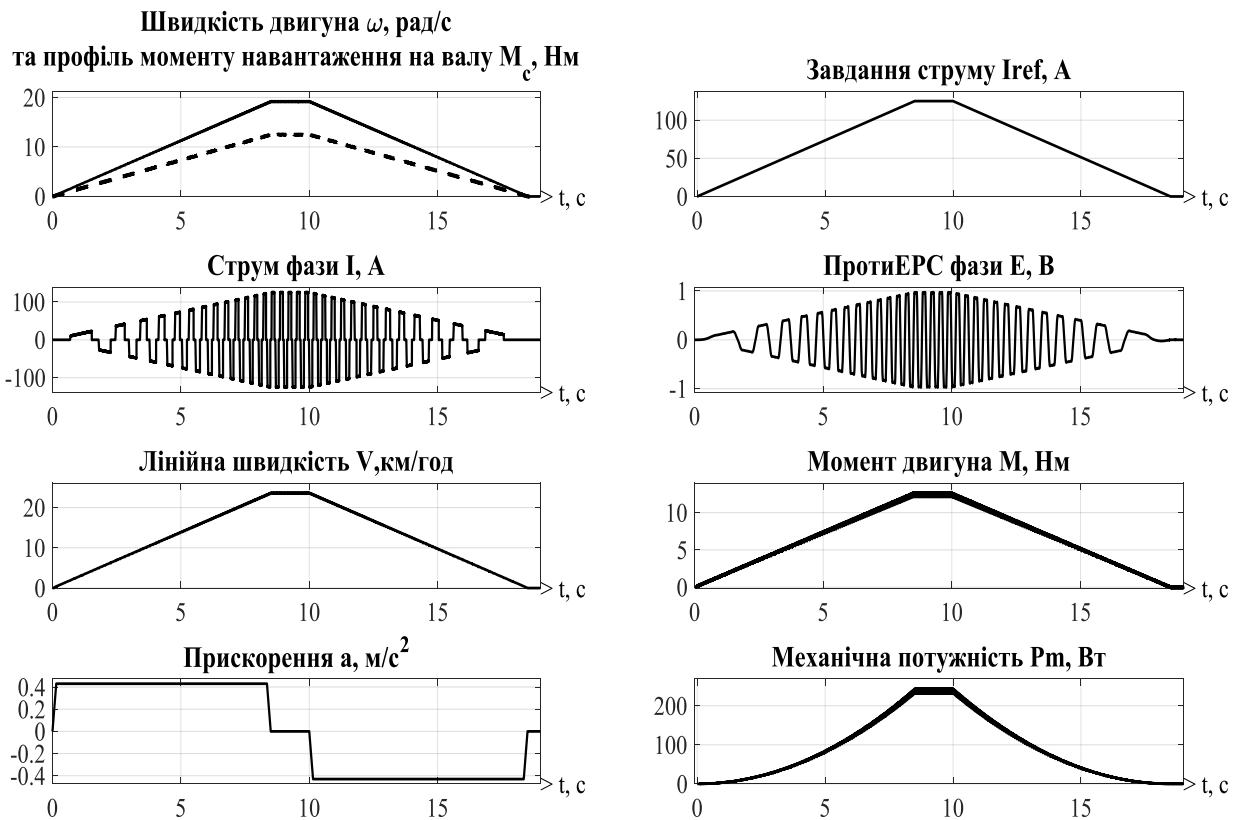


Рисунок 7 – Перехідні процеси в системі при відпрацюванні заданої траєкторії моменту обмеженої на значенні $0.5M_{ном}$

Висновки.

Аналізуючи графіки перехідних процесів встановлюємо відпрацювання заданої траєкторії моменту двигуна та обмеженість прискорення на заданому рівні для комфортного та безпечного руху.

Згідно перехідного процесу на ділянці усталеного режиму встановлюємо трапецієподібну форму проти-ЕРС, що характерна для BDCM .

Виходячи з вище наведеного, можна сказати, що досліджувана модель відповідає теоретичним відомостям та повинна гарантувати досягнення заданих цілей керування, що підтверджується виконаним моделюванням у середовищі PLECS.

Перелік посилань

1. D. C. Hanselman. Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2 ed., Magna Physics Publishing, 2006
2. M.V.Ramesh. Speed Torque characteristics of Brushless DC motor in either direction on load using ARM controller // Journal of Energy Technologies and Policy, vol. 2, 2011.
3. Schlenger A. Projektseminar WS 2012/2013, Mechatronik/Elektrische Antriebe. Paderborn, 2013.
4. J. Boecker. Mechatronics and Electrical Drives, Lecture Script. Paderborn: University of Paderborn, 2012.