УДК 62-83-52:621.313.3

І. З. Щур, І. В. Чупило, Ю. В. Павлів
Національний університет «Львівська політехніка»
кафедра електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем

СИСТЕМА ДВОЗОННОГО КЕРУВАННЯ БЕЗРЕДУКТОРНИМ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НИЗЬКОПІДЛОГОВОГО ТРАМВАЮ

© Щур І. З., Чупило І. В., Павлів Ю. В., 2015

Наведено систему двозонного керування безредукторним електроприводом на базі багатополюсної синхронної машини з постійними магнітами (СМПМ) для низькопідлогового трамваю. Особливістю системи є застосування гібридного спостерігача кутового положення ротора, який відтворює цей кут, а також кутову швидкість машини за сигналами трьох дискретних давачів Холла. У пакеті MATLAB/Simulink створено комп'ютерну модель системи та досліджено її роботу в широкому діапазоні регулювання швидкості.

Ключові слова: низькопідлоговий трамвай, безредукторний електропривід, СМПМ, гібридний спостерігач кутового положення ротора, двозонне керування швидкістю.

The paper presents two-zone control system of gearless electric drive based on a multipolar synchronous motor with permanent magnets (PMSM) for low-floor tram. The feature of the system is the use of hybrid observer of angular position of the rotor, which displays this angle and the angular velocity of the machine using the signals of three discrete Hall sensors. In the MATLAB/Simulink a computer model of the system was created and research its operation in a wide range of speed control.

Key words: low-floor tram, gearless electric drive, PMSM, hybrid observer of rotor angular position, dual-zone speed control.

Постановка задачі

У сучасному світі для швидкої та зручної посадки чи висадки пасажирів міський транспорт проектують та виготовляють низькопідлоговим. Застосування безредукторного електроприводу (БЕП) для міського електротранспорту збільшує його надійність та зменшує вартість, оскільки з електроприводу вилучають механічний редуктор [1,2]. З розрахунків зрозуміло, що для БЕП низькопідлогового трамваю на одному тяговому візку достатньо чотирьох двигунів потужністю 30 кВт кожен. Основним завданням при цьому була необхідність вкластися в розміри розробленого візка та габарити трамваю. У СКБ електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка» для тягового електроприводу низькопідлогового трамваю розроблено спеціальний двигун – синхронну машину з 34 постійними магнітами (СМПМ) потужністю 32 кВт та номінальною частотою обертання 260 об/хв. Така СМПМ з водяним охолодженням та поверхнево розміщеними на роторі магнітами має доволі високий показник моменту на одиницю ваги та об'єму. Електронна комутація обмоток якоря СМПМ здійснюватиметься за положенням ротора, яке фіксує давач кутового положення ротора (ДКПР) [3]. Застосування як ДКПР багатоточкового оптичного енкодера забезпечує практично гладкий момент на валу двигуна, проте енкодер займає додаткове місце, оскільки кріпиться на одному валу з електричною машиною, і має високу вартість [4]. Основними причинами неможливості застосування енкодера в електроприводі трамваю є жорстка обмеженість простору, несприятливість умов експлуатації (вода, пил, вібрації тощо), а також особлива конструкція порожнистого вала великого діаметра (у ньому поміщено муфту, шо зв'язує двигун з колесом) у цьому БЕП. Тому запропоновано використання трьох давачів

Холла зі своєю додатково вмонтованою інформаційною магнітною системою. Проте, як відомо, при дискретній комутації обмоток якоря виникають пульсації електромагнітного моменту, які в БЕП безпосередньо передаються на вал механізму, оскільки немає проміжних пружних ланок, які могли би демпфувати ці пульсації. В електроприводі трамваю це приводитиме до швидкого зношування бандажів коліс. Тому існує проблема поєднання завдання формування гладкого моменту та комутації обмоток якоря за сигналами дискретних ДКПР.

Аналіз останніх досліджень

Одним із вирішень цієї проблеми є застосування квазісинусоїдного принципу керування СМПМ з використанням 6 давачів Холла, який розроблено на кафедрі електроприводу та комп'ютеризованих електромеханічних систем (ЕПК) Національного університету «Львівська політехніка» [5,6]. Однак проведені дослідження показали, що в системі полярного керування з квазісинусоїдним принципом комутації обмоток якоря СМПМ існують проблеми реалізації рекуперативного гальмування, а також необхідне застосування спеціального естиматора моменту.

Відомий інший спосіб, який полягає в розрахунку поточного значення кута положення за поточним значенням кутової швидкості та корегування значення цього кута за сигналами дискретних ДКПР, так званий гібридний спостерігач (Hybrid Observer) [7]. Аналіз показує, що його застосування є найперспективнішим для БЕП з великим моментом інерції, що якраз властиво для електроприводу трамваю.

Ціль статті

Метою роботи є розроблення та дослідження системи керування тяговим електроприводом низькопідлогового трамваю з використанням гібридного спостерігача у разі двозонного керування кутової швидкості.

Виклад основного матеріалу

Гібридний спостерігач

Гібридний спостерігач, описаний у цій роботі, грунтується на on-line розв'язуванні такого тривіального матричного диференціального рівняння [7]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}\cos q_{\mathrm{rh}}\\ \sin q_{\mathrm{rh}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -w_{\mathrm{r}}\\ w_{\mathrm{r}} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos q_{\mathrm{rh}}\\ \sin q_{\mathrm{rh}}\end{bmatrix}, \qquad (1)$$

де θ_{rh} – кут положення ротора в електричних градусах; ω_{r} – кутова швидкість ротора в електричних градусах.

Це диференціальне рівняння разом з інформацією від трьох дискретних давачів Холла, розміщених на статорі СМПМ через 60 електричних градусів, покладено в основу структурної схеми гібридного спостерігача, яку показано на рис. 1. Основними завданнями гібридного спостерігача є визначення кутової швидкості та положення ротора синхронної машини. Однією з відмінностей між енкодером і гібридним спостерігачем є те, що гібридний спостерігач визначає не кут повороту ротора, а синус і косинус цього кута. У такий спосіб відбувається спрощення задачі, оскільки для системи векторного керування достатньо знати поточні значення косинуса і синуса кута повороту ротора в електричних градусах.

Кутова швидкість ротора визначатиметься дискретно за таким співвідношенням:

$$w_{\mathrm{r}}=\frac{\Delta q_{\mathrm{rh}}}{\Delta t}\ , \qquad (2)$$

де $\Delta\theta = 60^{\mathrm{o}}$ ел. – кут між розміщенням давачів Холла; Δt – час повороту ротора між сусідніми давачами Холла.

Блоки фіксованих значень $\cos\theta_{\mathrm{rh}}$ та $\sin\theta_{\mathrm{rh}}$ створено на підставі рис. 2. Фіксовані значення функцій синуса $(\pm 1/2,\ 1)$ та косинуса $(\pm\sqrt{3}/2,\ 0)$, які визначено в момент зміни стану будь-якого з давачів Холла з логічного нуля до логічної одиниці чи навпаки, використовуються для усунення

похибки між реальним та розрахованим значеннями функцій sin та cos під час роботи машини. Для визначення синуса та косинуса кута положення ротора двигуна перед його запуском використовуються початкові значення цих функцій відповідно ($\pm\sqrt{3}/2,\ 0$) та ($\pm 1/2,\ 1$), які визначено як середні значення між сусідніми кутами зміни стану давачів Холла (рис. 2).

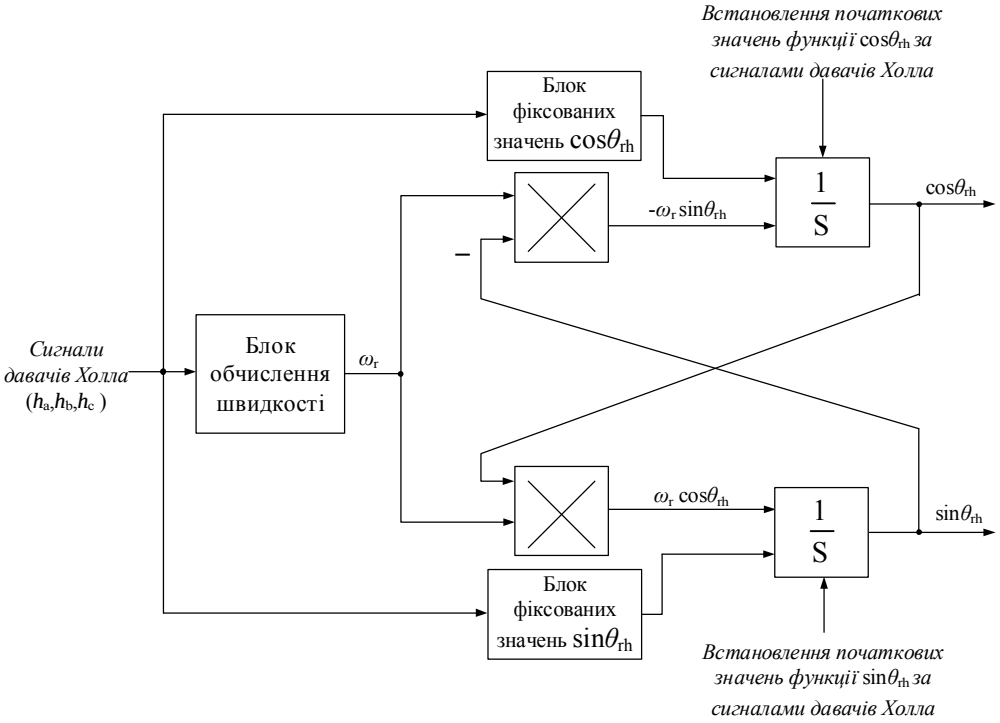


Рис. 1. Структурна схема гібридного спостерігача

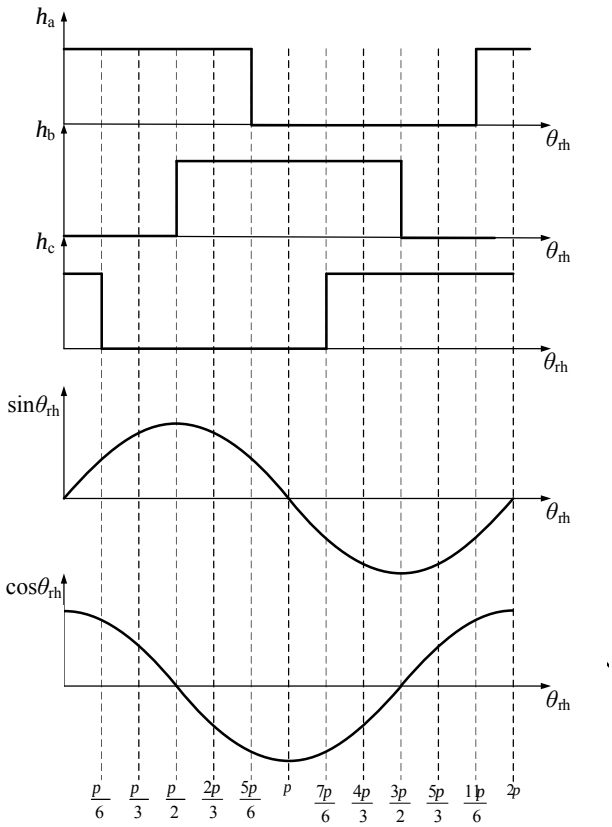


Рис. 2. Значення функцій sin та cos залежно від станів давачів Холла

Система керування тяговим БЕП трамваю

На рис. 3 зображено структурну схему системи керування тяговим БЕП низькопідлогового трамваю, побудовану за принципом системи підпорядкованого регулювання (СПР) з двома контурами регулювання: зовнішнім за кутової швидкості, реалізованим в обертовій з ротором системі координат *dq*, та внутрішнім за струмами якоря, реалізованим в системі фазних координат *abc*. Оскільки ця система керування розробляється для електроприводу низькопідлогового трамваю, то достатньо використати П-регулятор швидкості РШ, тому що водій трамваю часто змінює завдання швидкості, підтримуючи її на потрібному рівні. Автоматично регулювати струми якоря пропонується за допомогою релейних (гістерезисних) регуляторів струму, що порівнюють обчислені фазні значення струмів завдання з реальними струмами машини, які вимірюють відповідні давачі, і перемикають транзистори інвертора так, щоби похибка регулювання перебувала у заданому гістерезисом коридорі. Перетворення координат з *dq* в *ABC* та навпаки здійснюється за поточними значеннями синуса та косинуса, сформованими гібридним спостерігачем. Сигнал зворотного зв'язку за швидкістю формує гібридний спостерігач за дискретними сигналами давачів Холла. Комутація обмоток якоря двигуна здійснюється векторним керуванням мостовим транзисторним інвертором напруги, який отримує живлення від контактної мережі з постійною напругою 550 В.

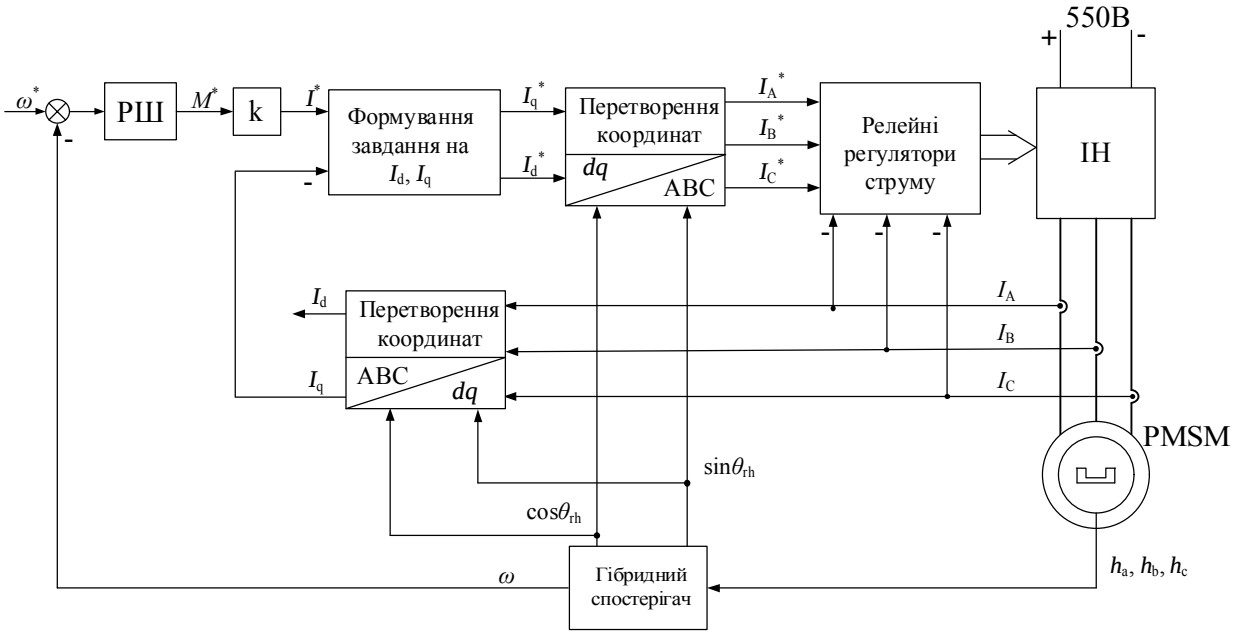


Рис. 3. Структурна схема системи керування тяговим БЕП низькопідлогового трамваю

Робота СМПМ у другій зоні керування швидкістю через ослаблення поля здійснюється завдяки введенню складової струму по осі *d*. Структурна схема блока формування завдання на проекції струму якоря I_q, I_d зображена на рис. 4 [8]. Принцип дії цього блока полягає ось у чому. Якщо появляється додатна різниця $I_{q.err}$ між значенням струму I^*, пропорційним до заданого РШ моменту двигуна, та виміряним і перетвореним до осі *q* значенням струму якоря I_q, то формується від'ємне задаюче значення складової струму по осі *d* – I_d^*, яке формує вздовж цієї осі магніторушійну силу, спрямовану проти потоку постійних магнітів. Ця магніторушійна сила знижує ЕРС двигуна, що приводить до збільшення струму по осі *q* і тим самим забезпечення заданого електромагнітного моменту двигуна. Поява немоментної складової струму якоря I_d призводить, очевидно, до зменшення обмеження за моментоформуючою складовою струму $I_q - I_{q.lm}$ за заданого умовами охолодження двигуна максимального значення струму якоря I_{max}. Це зумовлює зниження значень електромагнітного моменту СМПМ зі збільшенням її кутової швидкості.

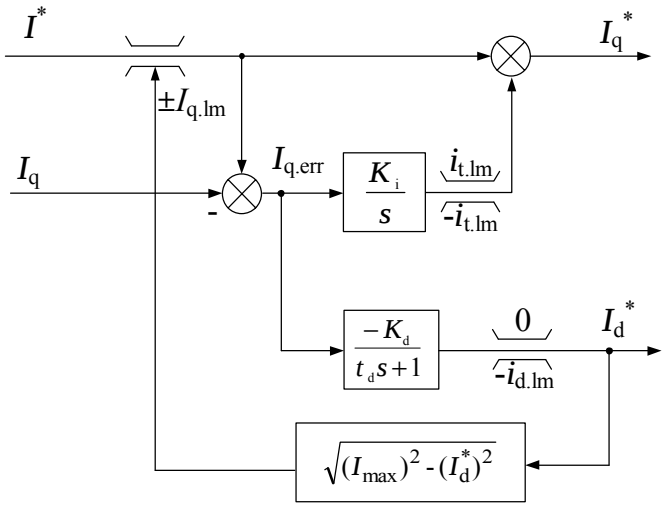


Рис. 4. Структурна схема блока формування завдання на I_q, I_d

Дослідження статичних характеристик системи за допомогою комп'ютерного моделювання

Для оцінювання працездатності цієї системи керування та дослідження роботи в середовищі MATLAB/Simulink створено комп'ютерну модель БЕП для низькопідлогового трамваю. Номінальні параметри досліджуваної СМПМ були такими: $P_н$ = 32 кВт, $M_н$ = 1175 Н·м, $\omega_{г.н}$ = 27,2 рад./с, $p_п$ = 17 , U_{DC} = 550 В, R = 0,278 Ом, $L_d = L_q$ = 3,06 мГн, $\psi_п$ = 0,518 Вб. Модель двигуна побудована без врахування магнітного насичення. Момент інерції на валу одного двигуна розраховано для реального п'ятисекційного трамваю зі спорядженою масою m = 55500 кг та з трьома тяговими візками, кожен з яких містить чотири двигуни. Діаметр колеса трамвая становить r = 0,71 м. Реальний момент інерції приводу, що припадає на один двигун, становить:

$$J = \frac{m \cdot r^2}{3 \cdot 4} = \frac{55500}{12} \cdot \left(\frac{0{,}71}{2} \right)^2 = 583 \text{ кг·м}^2. \quad (3)$$

Дослідження можливостей роботи в другій зоні керування швидкості полягало в отриманні максимального моменту, який може забезпечити двигун для заданих значень кутової швидкості. За результатами досліджень побудовано залежності моменту СМПМ від струму I_d для чотирьох значень кутової швидкості: 1,3$\omega_н$, 1,5$\omega_н$, 1,75$\omega_н$, 2,0$\omega_н$ (рис. 5).

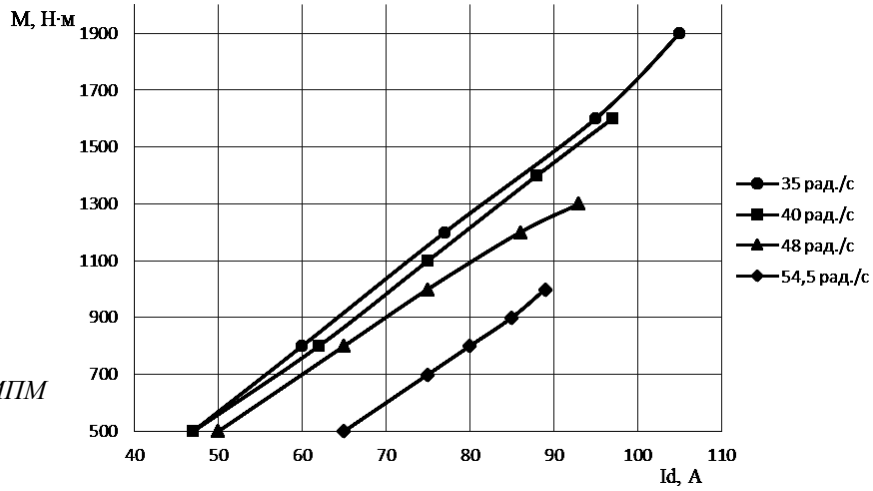
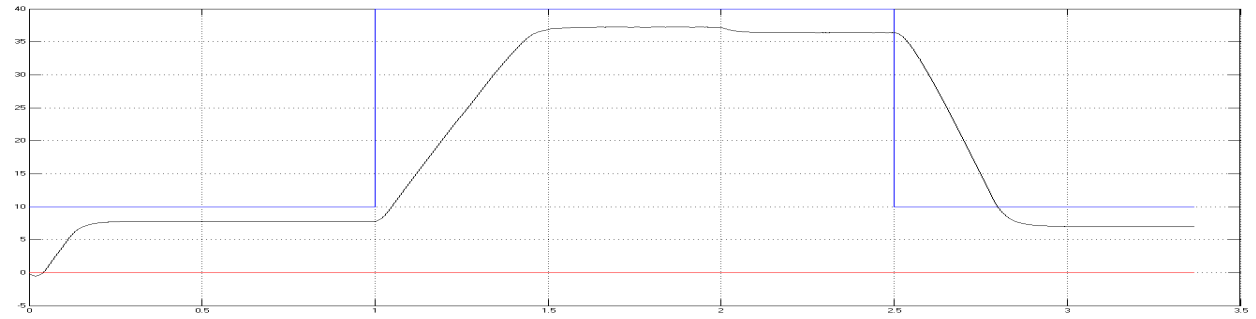


Рис. 5. Залежності моменту СМПМ від струму I_d

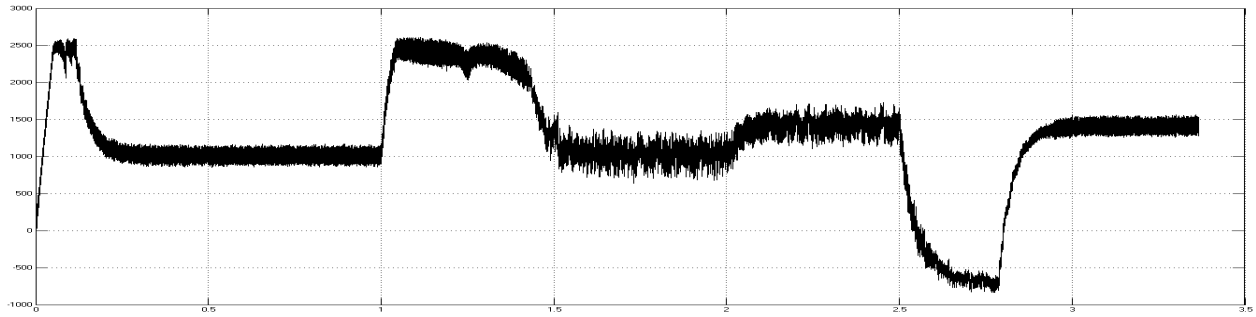
Як видно з рис. 5, при кутовій швидкості, яка в два рази вища від номінальної і відповідає лінійній швидкості трамваю 70 км/год, двигун розвиває момент 1000 Н·м, що майже дорівнює номінальному значенню.

Результати комп'ютерного симулювання роботи БЕП у динамічних режимах

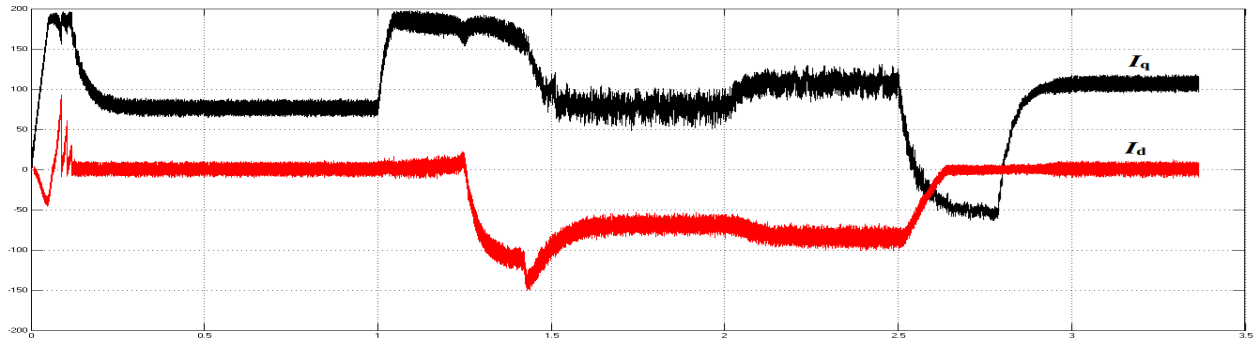
На рис. 6 наведено осцилограми кутової швидкості, моменту на валу двигуна та струмів по осях d і q під час руху спорядженого трамваю на сформованій тестовій тахограмі: рушання і розгін до швидкості 10 км/год, подальший розгін, починаючи з моменту часу 1 с до швидкості 47 км/год з переходом роботи СМПМ у другу зону в момент часу 1,25 с, зростання моменту двигуна до номінального значення в момент часу 2 с, гальмування, починаючи з моменту часу 2,5 с до швидкості 10 км/год.



а)



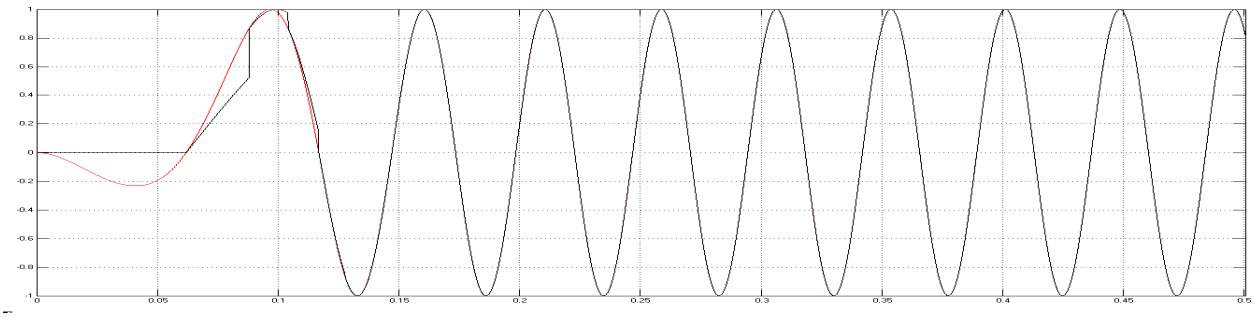
б)



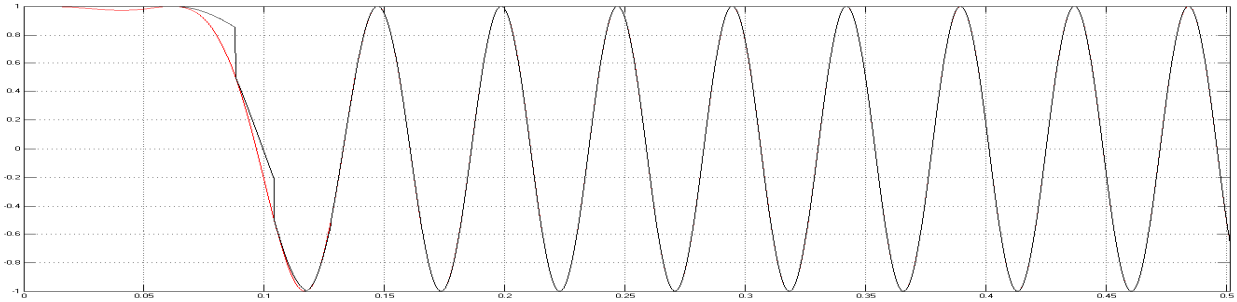
в)

Рис. 6. Результати комп'ютерного симулювання:
а – кутова швидкість ротора СМПМ [рад/с]; б – електромагнітний момент [Н·м];
в – струми по осях d і q [А]

На рис. 7 зображено осцилограми реальних та обчислених гібридним спостерігачем поточних значень синуса та косинуса кута повороту ротора в електричних градусах у початковий момент тривалістю 0,5 с під час рушання і руху трамваю. Як видно з осцилограм, похибка в обчисленні вказаних тригонометричних функцій має відчутне значення лише протягом першого періоду кута повороту ротора в електричних градусах, який триває 0,12 с. Це породжує пульсацію електромагнітного моменту на рівні 15 %, проте такий нетривалий час її дії не повинен негативно вплинути на стан бандажів коліс трамваю.



а)



б)

Рис. 7. Осцилограми синуса (а) та косинуса (б) кута повороту ротора в електричних градусах

Висновки

Застосувавши гібридний спостерігач, одержують достатньо хороші результати для того, щоб його можна було застосовувати у тяговому БЕП низькопідлогового трамваю. Він дає змогу сформувати гладкий момент двигуна за сигналами від дискретних ДКПР.

У другій зоні керування на швидкості обертання, яка в два рази перевищує номінальну, двигун забезпечує момент 1000 Н·м, що становить 85 % від номінального моменту двигуна.

У подальшому необхідно дослідити систему керування тягового БЕП низькопідлогового трамваю з уточненими параметрами СМПМ з врахуванням магнітного насичення.

1. Свечарник Д. В. Электромашины непосредственного привода: Безредукторный электропривод / Д. В.Свечарник. – М.: Энергоатомаиздат, 1988. – 208 с. 2. Wang G. Robust low-cost control scheme of direct-drive gearless traction machine for elevators without a weight transducer / G. Wang, G. Zhang, R. Yang, D. Xu // IEEE Trans. on Industrial Application. – 2012. – Vol. 48, no. 3. – P. 996–1005. 3. Chau K. T. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles / K. T. Chau, C. C. Chan, C.Liu // IEEE Trans. on Industry Electronics. – 2008. – Vol. 55. – P. 2246–2257. 4. Щур І. З. Принципи комутації безконтактного двигуна з постійними магнітами у безредукторному електроприводі / І. З. Щур, В. Б. Козій // Вестн. Национ. ун-та «Харьк. политехн. ин-т»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Вып. 30. – Харьков, 2008. – С. 427–430. 5. Щур І. З. Квазісинусоїдний принцип безконтактної позиційної комутації обмоток якоря синхронних машин з постійними магнітами в безредукторному електроприводі / І.З.Щур, В.Б.Козій // Електроінформ. – 2009. – №2. – С. 6–9. 6. Щур І. З. Полярне керування безредукторним безконтактним електроприводом постійного струму з квазісинусоїдною позиційною комутацією обмоток якоря / І. З. Щур, В. Б. Козій // Тематичний випуск науково-технічного журналу «Електроінформ»: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія и практика. – Львів, 2009. – С. 158–161. 7. Sudhoff S. D. A hybrid observer for high performance brushless DC motor drives / S. D. Sudhoff, K.A.Corzine // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1996. – Vol. 11, No. 2. – P. 318–323. 8. Sudhoff S. D. A flux-weakening strategy for current-regulated surface-mounted permanent-magnet machine drive / S. D. Sudhoff, H. J. Hegner // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1995. – Vol. 10, No. 3. – P. 431–437.