

УДК 62-52 : 621.313.33

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ БЕЗДАВАЧЕВОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**Б.І. Приймак**, канд. техн. наук, **Н.Д. Красношарпа**, канд. техн. наук, **Ф. Лозада**, **О.О. Долганов**Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна
e-mail: bp-08@ukr.net

Виконано параметричний синтез системи бездавачевого векторного керування асинхронним двигуном (АД) електромобіля зі спостерігачем швидкості ротора, побудованим за структурою адаптивної системи з еталонною моделлю. Шляхом математичного моделювання досліджено динамічні властивості синтезованої системи у режимах роботи, що характерні для тягового приводу електромобіля. Для удосконалення системи модернізовано алгоритм механізму адаптування спостерігача швидкості. Завдяки цьому в системі бездавачевого керування АД поліпшено показники якості та зменшено енерговитрати у перехідних процесах, спричинених змінами навантаження двигуна. Бібл. 10, рис. 7, таблиця.

Ключові слова: асинхронний двигун, бездавачевий привод, векторне керування, спостерігач швидкості, електромобіль.

Вступ. У сучасних електромобілях знаходять застосування тягові приводи з векторно-керуваними асинхронними двигунами (АД). У цих приводах АД має забезпечувати діапазон швидкостей від 0,01 до двох номінальних значень, мати переважувальну здатність до 200 %, відпрацьовувати східчасті зміни завдання та навантаження за 0,1...0,2 с. На сьогодні одним із перспективних методів керування АД є так зване бездавачеве керування [5], де давач швидкості двигуна відсутній, а в алгоритмі векторного керування замість сигналу швидкості використовується її оцінка, яка отримується за допомогою оцінювача (спостерігача). Перевагами бездавачевого керування АД є простіша механічна частина, менша кількість проводів, вища надійність та нижча вартість системи автоматичного керування (САК) АД.

Відомо декілька підходів до побудови спостерігачів швидкості АД. Зокрема, використовують структуру адаптивної системи з еталонною моделлю (АСЕМ) [3, 4, 6, 10], фільтр Калмана [7, 8], штучні нейронні мережі [2, 9] тощо. Бездавачеві системи зі спостерігачами на основі АСЕМ є простішими в практичній реалізації у порівнянні з іншими класами систем і набули найбільшого поширення. В роботі [6] запропоновано у спостерігачі швидкості зі структурою АСЕМ використовувати струмову модель кола статора АД і показано, що в цьому разі бездавачеве керування швидкістю АД є більш стабільним. Тому доцільно на основі аналогічного підходу побудувати бездавачеву САК АД, дослідити її характеристики за виконання технологічних вимог до тягового приводу електромобіля і відшукати шлях удосконалення цієї системи. Саме таким завданням присвячена ця стаття.

Мета роботи – дослідження динамічних властивостей бездавачевої САК АД електромобіля зі спостерігачем швидкості двигуна, побудованого на основі струмової моделі статорного кола за структурою адаптивної системи з еталонною моделлю, а також поліпшення показників якості системи при компенсуванні змін навантаження двигуна.

Побудова системи бездавачевого векторного керування АД. У рухомих координатах (d, q) , що обертаються зі швидкістю ω_0 , ідеалізований короткозамкнутий АД описується системою диференціальних рівнянь [5]

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + d\Psi_{sd}/dt - \omega_0 \Psi_{sq}, \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + d\Psi_{sq}/dt + \omega_0 \Psi_{sd}, \\ 0 &= R_r I_{rd} + d\Psi_{rd}/dt - (\omega_0 - z_p \omega) \Psi_{rq}, \\ 0 &= R_r I_{rq} + d\Psi_{rq}/dt + (\omega_0 - z_p \omega) \Psi_{rd}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$M - M_L = J d\omega/dt,$$

де змінними є компоненти векторів напруги статора $\bar{U}_s = [U_{sd}, U_{sq}]^T$, струму статора $\bar{I}_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T$, струму ротора $\bar{I}_r = [I_{rd}, I_{rq}]^T$, потокозчеплення статора $\bar{\Psi}_s = [\Psi_{sd}, \Psi_{sq}]^T$, потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r = [\Psi_{rd}, \Psi_{rq}]^T$; $M = (3z_p/2)K_r(\Psi_{rd}I_{sq} - \Psi_{rq}I_{sd})$ – електромагнітний момент двигуна; M_L – момент навантаження; J – момент інерції приводу; z_p – кількість пар полюсів; ω – кутова швидкість ротора двигуна; R_s, R_r – відповідно активні опори фаз статора та ротора, зведеного до статора; $K_r = L_m/L_r$. Потокозчеплення пов'язані зі струмами виразами

$$\Psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; \quad \Psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; \quad (2)$$

$$\Psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \quad \Psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}, \quad (3)$$

де L_m – індуктивність намагнічування; $L_s = L_m + L_{s\sigma}$, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повні індуктивності фаз; $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання статора та ротора відповідно.

У нерухомих відносно статора координатах (a, b) опис АД отримаємо із системи рівнянь (1), прийнявши в ній $\omega_0 = 0$. Враховуючи вирази (2), (3), отримаємо рівняння (4), (5) для визначення оцінок потокозчеплень $\hat{\Psi}_{ra}, \hat{\Psi}_{rb}$ та рівняння (6), (7) для визначення оцінок струмів $\hat{I}_{sa}, \hat{I}_{sb}$ у вигляді

$$d\hat{\Psi}_{ra}/dt = L_m T_r^{-1} I_{sa} - T_r^{-1} \hat{\Psi}_{ra} - z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{rb}; \quad (4)$$

$$d\hat{\Psi}_{rb}/dt = L_m T_r^{-1} I_{sb} - T_r^{-1} \hat{\Psi}_{rb} + z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{ra}; \quad (5)$$

$$d\hat{I}_{sa}/dt = AU_{sa} - BI_{sa} + C\hat{\Psi}_{ra} + Dz_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{rb}; \quad (6)$$

$$d\hat{I}_{sb}/dt = AU_{sb} - BI_{sb} + C\hat{\Psi}_{rb} - Dz_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{ra}, \quad (7)$$

де $A = \frac{1}{\sigma L_s}$; $B = \frac{R_r L_m^2 + R_s L_r^2}{\sigma L_s L_r^2}$; $C = \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r^2}$; $D = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$; $\hat{\omega}$ – оцінка швидкості ротора. Помилка спостерігача e_o визначається за виразом [6]

$$e_o = (I_{sa} - \hat{I}_{sa}) \hat{\Psi}_{rb} - (I_{sb} - \hat{I}_{sb}) \hat{\Psi}_{ra}. \quad (8)$$

Для задачі адаптування в спостерігачі зазвичай застосовується пропорційно-інтегральний (ПІ) алгоритм, опис якого має вигляд

$$\hat{\omega}(t) = k_p e_o(t) + k_i \int_0^t e_o(t) dt, \quad (9)$$

де k_p, k_i – коефіцієнти підсилення пропорційної та інтегральної складових відповідно.

На основі виразів (4)...(9) побудована структурна схема спостерігача швидкості (СШ) ротора, яка зображена на рис. 1. Спостерігач являє собою АСЕМ, де роль еталонної моделі відіграє власне АД, налаштовувана модель функціонує згідно з рівняннями (4), (5) та (6), (7), а у механізмі адаптування використовується ПІ-алгоритм (9).

Якщо рухомі координати (d, q) зорієнтовані за вектором потокозчеплення ротора, що математично виражається у вигляді умов $\Psi_{rq} = 0$, $d\Psi_{rq}/dt = 0$, $\Psi_{rd} = |\bar{\Psi}_r|$, то швидкість координат визначатиметься як $\omega_0 = z_p \omega + K_r R_r I_q / \Psi_r$, де $\Psi_r \equiv |\bar{\Psi}_r|$, $I_q \equiv I_{sq}$ (нижче, для спрощення, індекс "s" в компонентах вектора струму опускаємо), то з (1)...(3) отримаємо широко відомий опис АД, на основі якого будуються системи векторного керування [5].

Функціональна схема САК АД електромобіля, де швидкість не вимірюється датчиком, а оцінюється описаним вище спостерігачем, зображена на рис. 2. У цій схемі застосовано позначення: ДЖ – джерело живлення; СП – силовий перетворювач; ПК – перетворювач координат; ПФ – перетворювач фаз; БФ – блок фільтрів; ФП – функціональний перетворювач; БКЗ – блок компенсування зв’язків; РШ, РП, РС_q, РС_d – відповідно регулятори швидкості ω , модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_r , струмів I_q та I_d (проекцій вектора струму статора на осі d та q обертових координат (d, q) , що зорієнтована за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$); ω^* – завдання швидкості; e – помилка регулювання швидкості; I_d^* , I_q^* – завдання струмів; u_d , u_q – сигнали завдання компонент вектора напруги статора; Ψ_r^* – завдання потокозчеплення ротора; \hat{R}_s , \hat{R}_r – оцінки опорів статора та ротора, які визначаються одним із відомих способів [5, 10] і використовуються для налаштування системи до варіацій термозалежних параметрів АД. Призначенням БКЗ є зменшення взаємовпливу каналів формування потокозчеплення та моменту в АД

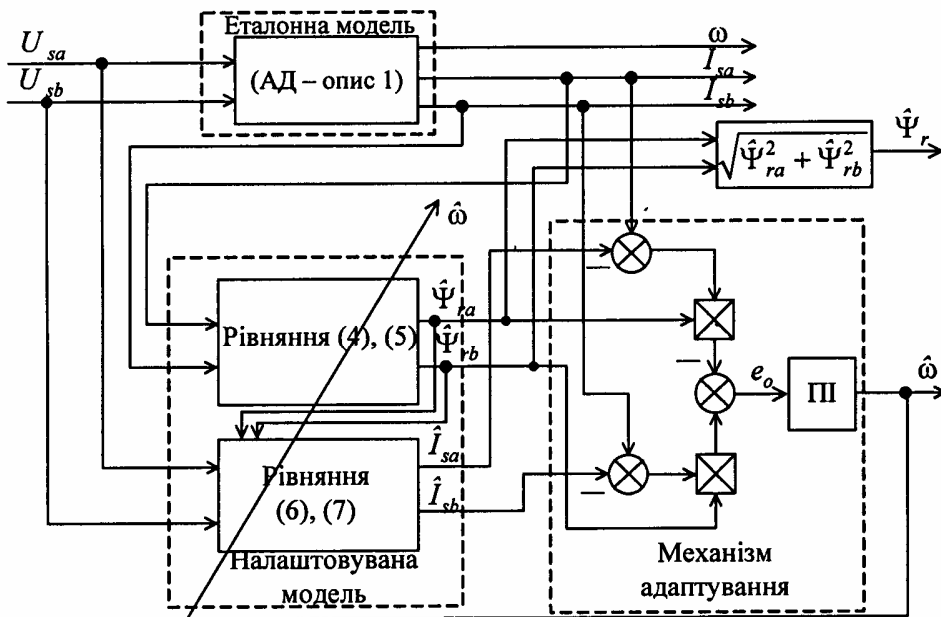


Рис. 1

Рис. 2

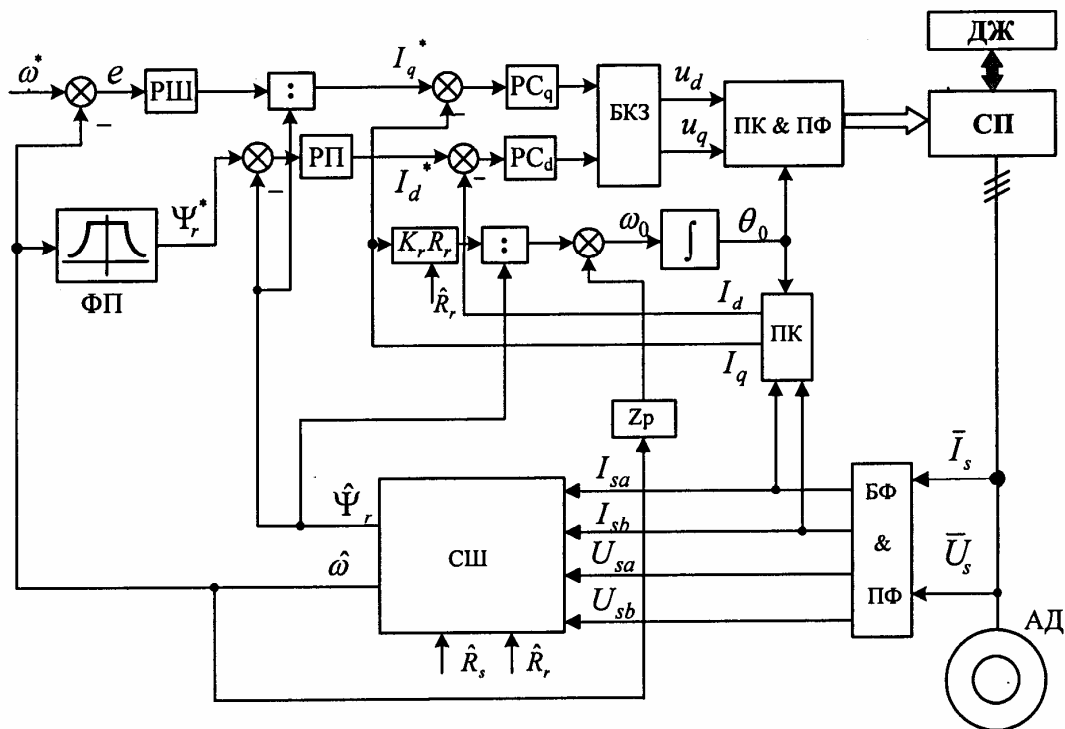


Рис. 2

шляхом прямого компенсування внутрішніх перехресних зв'язків, наявних між цими каналами [5].

Дослідження властивостей бездавачевої САК АД електромобіля. Проведемо дослідження якості функціонування побудованої вище бездавачевої САК АД шляхом моделювання. При складанні сценаріїв виконуваних дослідів необхідно відтворити технологічні особливості роботи тягового привода електромобіля. Зокрема, треба оцінити якість функціонування системи на низьких швидкостях, включаючи нульову, на близьких до номінальної швидкостях (середні швидкості), а також у зоні вищих за номінальну швидкостей при ослабленні поля АД (високі швидкості). Діапазон змін навантажень у дослідженні має бути від нуля до номінального. Також слід перевірити роботу системи як у русійному, так і в гальмівному рекуперативному режимах двигуна, при збільшенні та зменшенні завдання швидкості за лінійною залежністю від часу, а також при реверсі.

Далі для числових досліджень використано типовий чотириполюсний АД потужністю 30 кВт. Номінальні дані двигуна подано у таблиці, де P – вихідна потужність, U , I – напруга та струм фази статора (діючі значення), f , N – частота живлення та швидкість вала.

Таблиця 1 – Номінальні дані АД

$P=30$ кВт	$U=220$ В	$I=56,8$ А
$f=50$ Гц	$N=1467$ об/хв	$\cos\varphi=0,88$
$J=0,69$ кгЧм ²	$R_S = 0,1376$ Ом	$R_r = 0,0862$ Ом
$L_S = 43,14$ мГн	$L_r = 43,64$ мГн	$L_m = 41,83$ мГн

Модель бездавачевої САК АД електромобіля побудовано у середовищі Matlab/Simulink відповідно до наведеної на рис. 2 схеми. У моделі РШ, РП, РС_q, РС_d були ПІ-регуляторами зі стандартними налаштуваннями. Перший з них налаштований на симетричний оптимум, а останні три – на модульний оптимум [5]. У зоні ослаблення поля ФП змінює завдання потокозчеплення обер-

нено пропорційно до ω . У механізмі адаптування спостерігача коефіцієнти ПІ-алгоритму були задані $k_p = 0,5$, $k_i = 25$. Вони визначалися ітераційно шляхом підбору, виходячи із якості перехідного процесу швидкості двигуна.

У першому досліді, результати якого представлені на рис. 3, оцінювалися властивості бездавачевої САК АД в області низьких швидкостей двигуна. Сценарій цього дослідження полягав у тому, що із попередньо збудженим АД система на інтервалі часу $t = 2...5$ с відпрацьовувала завдання нульової швидкості $\omega^* = 0$, а на інтервалі $t = 6...9$ с відпрацьовувала завдання $\omega^* = 0,2$ в.о. (в.о. – відносні одиниці). У моменти часу $t = 3$ с та $t = 7$ с здійснювався стрибкоподібний накид навантаження двигуна від $M_L = 0$ до номінального $M_L = 1$ в.о., а в моменти часу $t = 4$ с та $t = 8$ с відбувався скид навантаження до нуля.

Аналізуючи наведені на рис. 3 криві, бачимо, що процеси керування стійкі, розходження між сигналами швидкості ω та її оцінки $\hat{\omega}$ не є значними. Потокова складова струму статора та модуль вектора потокозчеплення ротора Ψ_r підтримуються на номінальному рівні. Максимальне значення динамічної помилки швидкості $e_{\max} = |e(t)|_{\max} \approx 3,85$ рад/с, що становить 2,5 % від номінальної швидкості ω_n .

Другий дослід, результати якого представлені на рис. 4, мав на меті виявити властивості бездавачевої САК АД в області середніх швидкостей двигуна. Його сценарій був наступним. Спочатку АД збуджується і в момент часу $t = 1$ с накидається навантаження $M_L = 0,5$ в.о. На інтервалі часу $t = 2...6,5$ с завдання швидкості зростає за лінійним законом від нуля до 0,9 в.о., а потім протягом $t = 6,5...10$ с система відпрацьовує постійне завдання $\omega^* = 0,9$ в.о. На момент часу $t = 6,5$ с навантаження двигуна скидається до нуля, а в інтервалі $t = 8...9$ с прикладається від'ємний момент навантаження $M_L = -0,5$ в.о. і привод працює в режимі рекуперативного гальмування.

За наведеними на рис. 4 кривими можна зазначити, що на середніх швидкостях двигуна показники якості бездавачевої САК АД є задовільними. Максимальне значення динамічної помилки швидкості $e_{\max} \approx 1,6$ рад/с, що складає 1% від ω_n .

У третьому досліді, результати якого представлені на рис. 5, оцінювалися властивості бездавачевої САК АД в області високих швидкостей двигуна. Сценарій досліді полягав у тому, що після збудження АД на інтервалі часу $t = 2 \dots 9,5$ с завдання швидкості збільшується за лінійним законом від нуля до 1,5 в.о., далі протягом $t = 9,5 \dots 12$ с завдання є постійним $\omega^* = 1,5$ в.о., потім на інтервалі $t = 12 \dots 20,5$ с завдання швидкості зменшується за лінійним законом до $-0,2$ в.о. і відбувається реверс швидкості приводу, а при $t = 20,5 \dots 21$ с завдання є постійним $\omega^* = -0,2$ в.о. Момент навантаження змінювався стрибкоподібно і протягом п'яти інтервалів часу мав такі значення: $t = 0 \dots 1,5$ с – $M_L = 0$; $t = 1,5 \dots 9,5$ с – $M_L = 0,3$ в.о.; $t = 9,5 \dots 10$ с – $M_L = 0$; $t = 10 \dots 11$ с – $M_L = -0,3$ в.о.; $t = 11 \dots 21$ с – $M_L = 0,3$ в.о. Отже, в зоні високих швидкостей поряд з рушійним режимом роботи двигуна було перевірено режим холостого ходу та рекуперативного гальмування (3- та 4-й інтервали часу відповідно).

Представлені на рис. 5 графіки дають змогу відмітити, що на високих швидкостях процеси керування стійкі, крива оцінки $\hat{\omega}$ практично повторює криву швидкості ω . Коли швидкість двигуна менша, ніж номінальна $|\omega| \leq \omega_n$, то модуль вектора потокозчеплення ротора Ψ_r підтримується на номінальному рівні, а при $|\omega| > \omega_n$ значення Ψ_r зменшується обернено пропорційно до ω . Напруга фази статора не перевищує номінального рівня. Максимальне значення динамічної помилки швидкості $e_{\max} \approx 2$ рад/с, що складає 1,3% від ω_n .

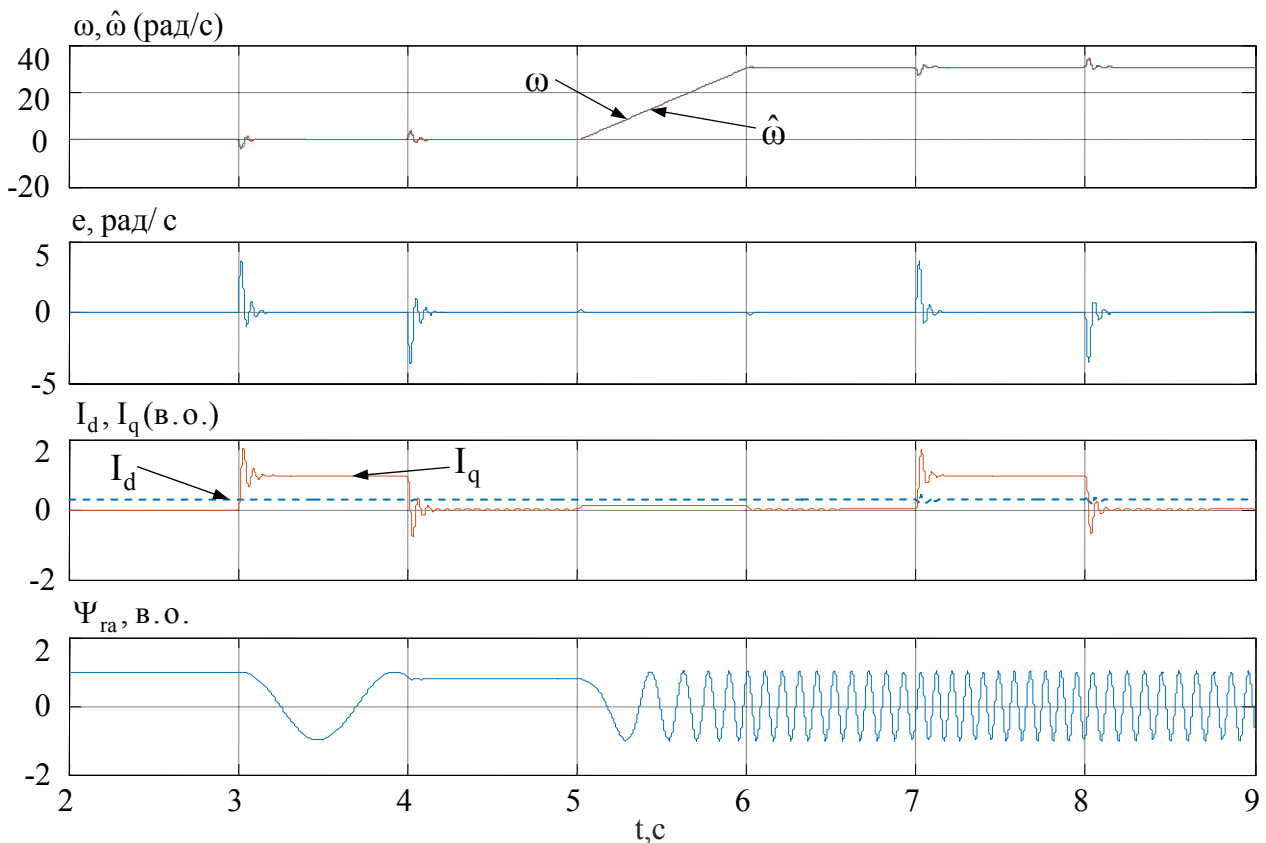


Рис. 3

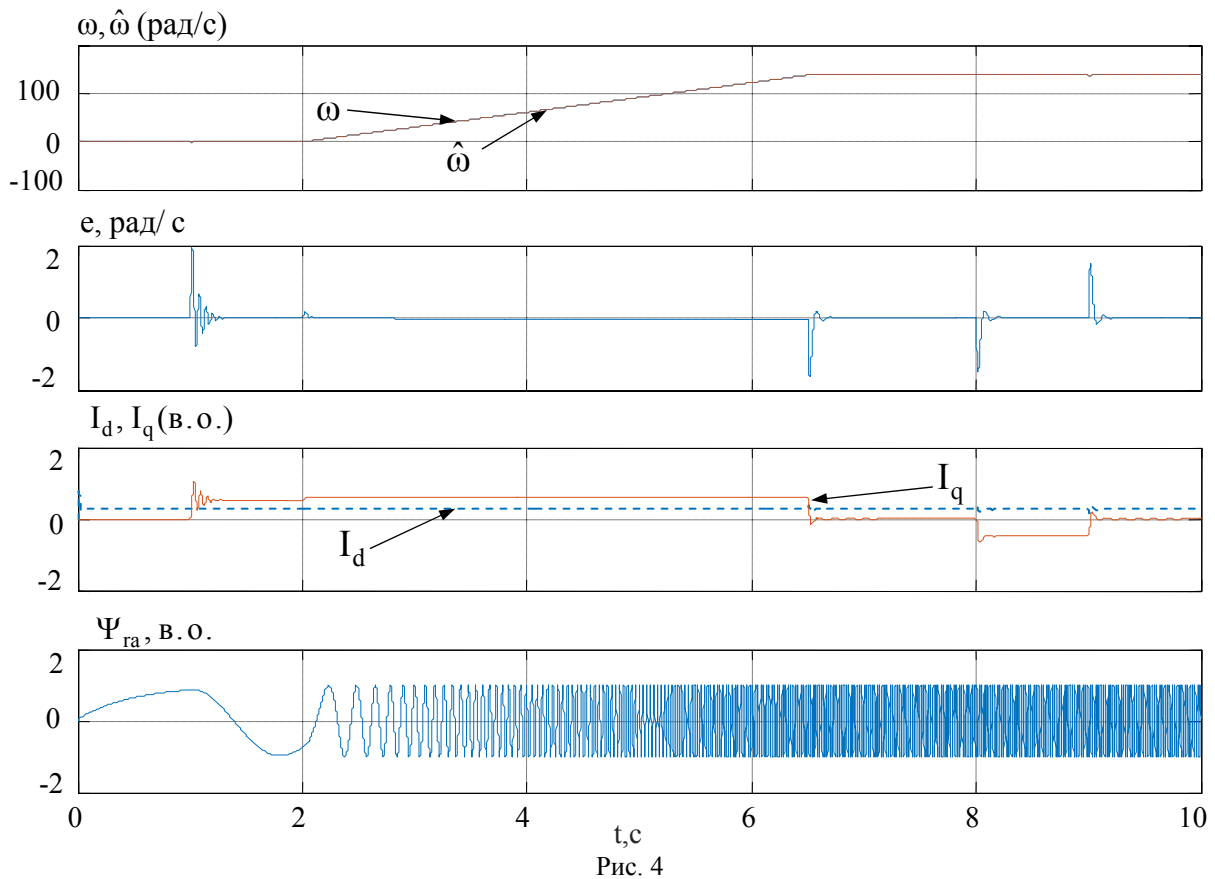


Рис. 4

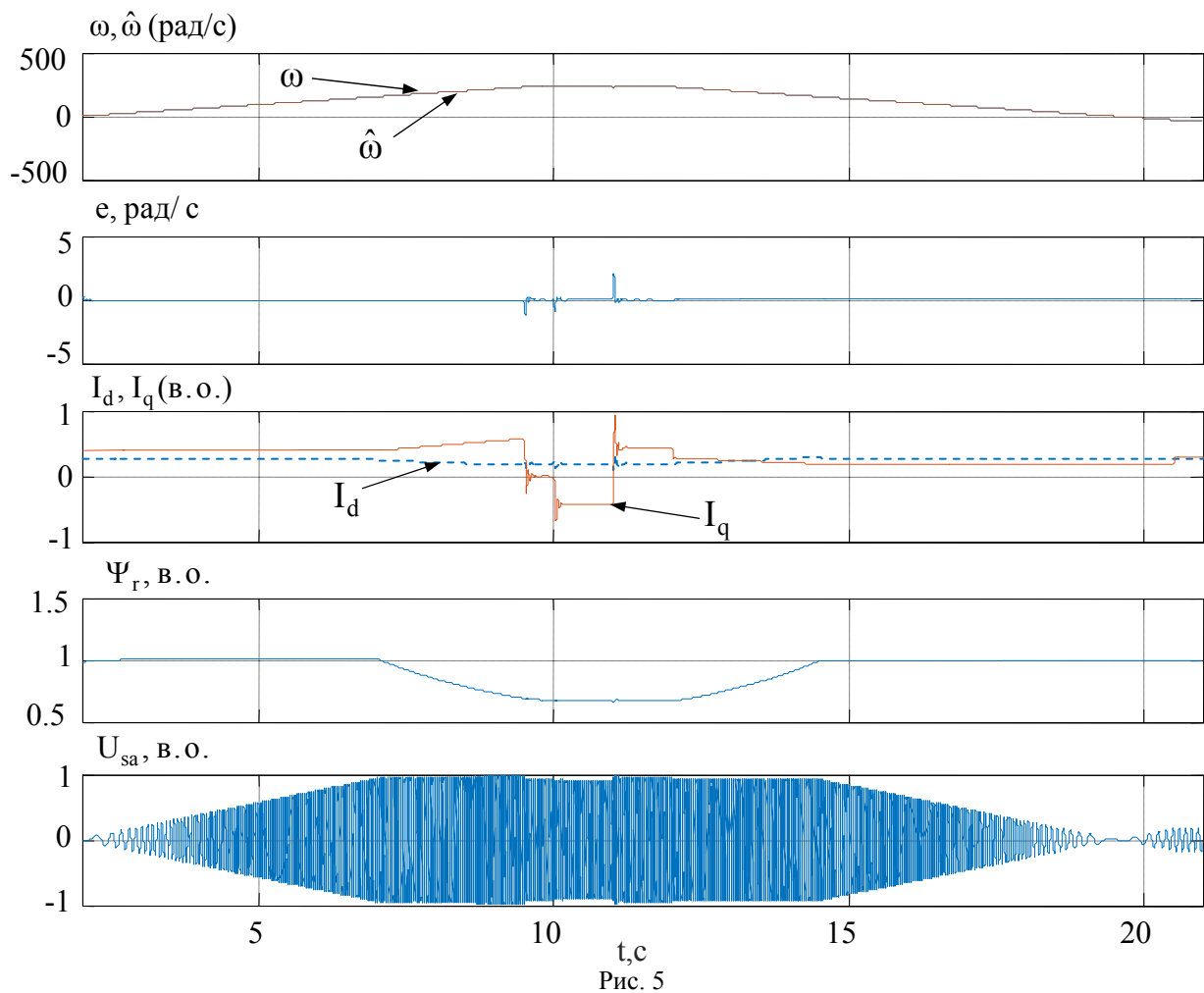


Рис. 5

Поліпшення показників бездавачевої САК АД електромобіля. Наведені результати дослідження бездавачевої САК АД електромобіля у цілому засвідчили її працездатність. З метою поліпшення властивостей системи було запропоновано удосконалити спостерігач швидкості, де замість традиційного ПІ-алгоритму механізму адаптування [3, 4, 6, 10], що описується (9), застосовано пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритм, що описується рівнянням

$$\hat{\omega}(t) = k_p e_o(t) + k_i \int_0^t e_o(t) dt + k_d \dot{e}_o(t), \quad (10)$$

де k_p, k_i, k_d – відповідно коефіцієнти підсилення пропорційної, інтегральної та диференціальної складових сигналу.

Для визначення показників розглянутої та удосконаленої бездавачевої САК АД було проведено досліди з математичними моделями обох систем. Щоб виявити «чистий» ефект від дії похідної помилки спостерігача у механізмі адаптування, коефіцієнти підсилення пропорційної та інтегральної складових в ПІ- та ПІД-алгоритмі СШ були встановлені однаковими. Їх значення були тими самими, що й раніше: $k_p = 0,5$, $k_i = 25$. Коефіцієнт підсилення диференціальної складової було вибрано $k_d = 0,06$. Досліди полягали у тому, що під час усталеного руху на швидкості $\omega = 0,1$ в.о. ненавантаженого двигуна в момент часу $t = 2,5$ с відбувався стрибкоподібний накид навантаження $M_L = 1$ в.о. Перехідні процеси компенсування накиду навантаження в бездавачевій САК АД з використанням у механізмі адаптування спостерігача ПІ-алгоритму зображені на рис. 6, а ПІД-алгоритму – на рис. 7.

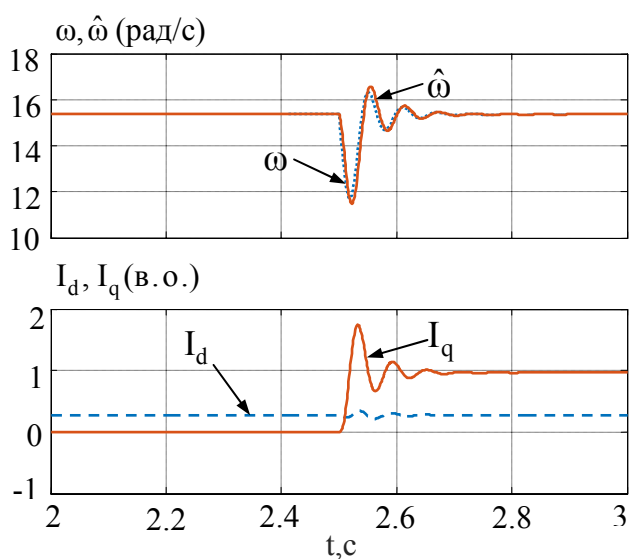


Рис. 6

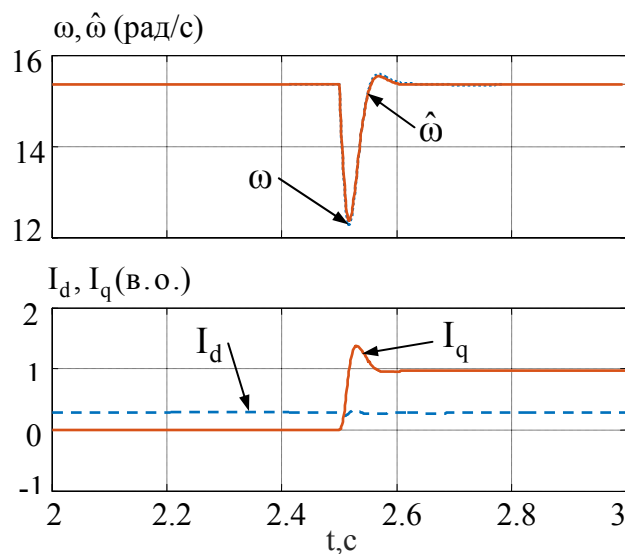


Рис. 7

Аналізуючи рис. 6, можна зазначити, що максимальне динамічне відхилення швидкості двигуна $\Delta\omega_{\max} = |\Delta\omega(t)|_{\max}$ при застосуванні в спостерігачі ПІ-алгоритму дорівнює $\Delta\omega_{\max, \text{ПІ}} = 3,64$ рад/с, а час компенсування системою збурення тут складає $t_{\kappa, \text{ПІ}} = 0,12$ с. У разі застосування в спостерігачі ПІД-алгоритму, як видно з рис. 7, $\Delta\omega_{\max, \text{ПІД}} = 3,08$ рад/с, а $t_{\kappa, \text{ПІД}} = 0,083$ с. У відсотках зменшення максимального динамічного відхилення керованої величини складає $(1 - \Delta\omega_{\max, \text{ПІД}} / \Delta\omega_{\max, \text{ПІ}}) \times 100\% \approx 15,4\%$, а зменшення часу компенсування збурення дорівнює $(1 - t_{\kappa, \text{ПІД}} / t_{\kappa, \text{ПІ}}) \times 100\% \approx 31\%$.

Варто також порівняти енергетичні властивості системи з алгоритмами, що розглядаються. Згідно з [1], в ідеалізованому АД електричні втрати потужності ΔP_q від компоненти I_q вектора струму статора можна обчислити як

$$\Delta P_q = 1,5 I_q^2 (R_s + K_r^2 R_r). \quad (11)$$

Втрати активної енергії в АД від компоненти I_q за інтервал часу $\Delta t \in (t_1, t_2)$ дорівнюватимуть

$$\Delta E_q = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_q(t) dt. \quad (12)$$

Прийнявши $t_1 = 2,5$ с, $t_2 = 2,5$ с + $t_{\kappa, \text{ПД}}$, за (12) та (11) для зображеної на рис. 6 кривої $I_q(t)$ було отримано $\Delta E_{q, \text{ПД}} = 270,2$ Дж, а для зображеної на рис. 7 – $\Delta E_{q, \text{ПД}} = 247,8$ Дж. У відсотках зменшення втрат енергії складає $(1 - \Delta E_{q, \text{ПД}} / \Delta E_{q, \text{ПД}}) \times 100 \% \approx 8,3 \%$.

Таким чином, проведене дослідження засвідчило, що завдяки застосуванню в механізмі адаптування спостерігача ПД-алгоритму, на відміну від традиційно використовуваного П-алгоритму, в бездавачевій САК АД електромобіля істотно поліпшено показники якості керування та зменшено втрати енергії в перехідних процесах, що спричинені змінами навантаження двигуна.

Треба зазначити, що у проведених дослідженнях значення всіх параметрів моделі АД вважалися відомими і незмінними. Щодо впливу на властивості системи варіацій параметрів двигуна, то це важливе питання планується вивчити в одній з наступних праць.

Висновки. Виконано параметричний синтез системи бездавачевого векторного керування асинхронним тяговим приводом електромобіля зі спостерігачем швидкості двигуна, побудованого на основі струмової моделі АД за структурою адаптивної системи з еталонною моделлю. Дослідження математичної моделі системи засвідчили її працездатність у технологічно необхідних діапазонах швидкостей та навантажень тягового двигуна електромобіля як у рушійному, так і в гальмівному рекуперативному режимах роботи.

Для удосконалення системи запропоновано в механізмі адаптування спостерігача замість традиційного алгоритму першого порядку (П-алгоритм) застосувати алгоритм другого порядку (ПД-алгоритм). Завдяки цьому в бездавачевій САК АД істотно поліпшено показники якості керування та зменшено втрати енергії у перехідних процесах компенсування змін навантаження двигуна. Зокрема, динамічне відхилення швидкості, час компенсування збурення та втрати енергії зменшилися відповідно на 15,4; 31 і 8,3 %.

1. Приймак Б.І. Моделі втрат потужності у керованій асинхронній машині для задач енергозбереження. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 1. С. 29–38.
2. Gadoue S.M., Giaouris D., Finch J.W. Sensorless control of induction motor drives at very low and zero speeds using neural network flux observers. *IEEE Trans. Ind. Elec.* 2009. Vol. 56, No. 8. P. 3029–3039.
3. Kubota H., Matsuse K. Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation. *IEEE Trans. Ind. Applicat.* 1994. Vol. 30, No 5. P. 1219–1224.
4. Maiti S., Chakraborty C., Hori Y., Ta M.C. Model reference adaptive controller-based rotor resistance and speed estimation techniques for vector controlled induction motor drive utilizing reactive power. *IEEE Trans. Ind. Elec.* 2008. Vol. 55, No. 2. P. 594–601.
5. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector control and dynamics of AC drives, Oxford: Clarendon press. 2005. 440 p.
6. Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M. Stator-Current-Based MRAS Estimator for a Wide Range Speed-Sensorless Induction Motor Drive. *IEEE Trans. Ind. Elec.* 2010. Vol. 57, No. 4. P. 1296–1308.
7. Salvatore L., Stasi S., Cupertino F. Improved rotor speed estimation using two Kalman filter-based algorithms. *Proc. IEEE-IAS Annu. Meeting*. 2001. P. 125–132.
8. Shi K.L., Chan T.F., Wong Y.K., Ho S.L. Speed estimation of an induction motor drive using an optimized extended Kalman filter. *IEEE Trans. Ind. Elec.* 2002. Vol. 49, No. 1. P. 124–133.
9. Sun X., Chen L., Yang Z., Zhu H. Speed-sensorless vector control of a bearingless induction motor with artificial neural network inverse speed observer. *IEEE/ASME Trans. Mechatr.* 2013. Vol. 18, No. 4. P. 1357–1366.
10. Vasic V., Vukosavic S.N., Levi E. A stator resistance estimation scheme for speed sensorless rotor flux oriented induction motor drives. *IEEE Trans. Energy Conversion*. Dec. 2003. Vol. 18, No.4. P. 476–483.

УДК 62-52 : 621.313.33

Б.И. Приймак, канд. техн. наук, **Н.Д. Красношапка**, канд. техн. наук, **Ф. Лозада**, **О.О. Долганов**

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

Динамические свойства системы бездатчикового векторного управления асинхронным приводом электромобиля

Выполнен параметрический синтез системы бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем (АД) электромобиля с наблюдателем скорости ротора, построенным по структуре адаптивной системы с эталонной моделью. Путем математического моделирования исследованы динамические свойства синтезированной системы в режимах работы, характерных для тягового привода электромобиля. Для усовершенствования системы модернизирован алгоритм механизма адаптации наблюдателя скорости. Благодаря этому в системе бездатчикового управления АД улучшены показатели качества и уменьшены потери энергии в переходных процессах, вызванных изменениями нагрузки двигателя. Библ. 10, рис. 7, таблица.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, бездатчиковый привод, векторное управление, наблюдатель скорости, электромобиль.

B. Pryymak, N. Krasnoshapka, F. Lozada, O. Dolganov

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

Dynamic properties of the sensorless vector control system of induction motor drive of electric vehicle

The parametric synthesis of the sensorless vector control system of an induction motor (IM) of electric vehicle with the rotor speed observer, which is constructed according to the structure of the model reference adaptive system, is made. Through mathematical modeling, the dynamical properties of the synthesized system in operating modes, which are characteristic for a traction drive of an electric vehicle, are investigated. To improve the system, an algorithm for the speed observer adaptation mechanism has been upgraded. Due to this, in the sensorless control system of IM improved quality and reduced energy losses in transient processes caused by changes in motor load. References 10, figures 7, table.

Key words: induction motor, sensorless drive, vector control, speed observer, electric vehicle.

Надійшла 16.02.2018

Received 16.02.2018