

УДК 62-83:621.313

Ю. О. Білецький

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
yurii.o.biletskyi@lpnu.ua

Ю. В. Ломпарт

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
yurii.v.lompart@lpnu.ua

М. А. Маляр

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра систем автоматизованого проектування,
mykola.a.maliar@lpnu.ua

СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕНЕРГОФОРМУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНО-ТЯГОВИМИ СИСТЕМАМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА БАЗІ BLDC ДВИГУНА

<https://doi.org/>

© Білецький Ю. О., Ломпарт Ю. В., Маляр М. А., 2024

Електромобільність у сучасному суспільстві стрімко розвивається, що зумовлено як постійним розвитком накопичувальних систем, так й інноваціями у сфері конструювання високоефективних електродвигунів, а також і силової електроніки. Цей розвиток вирішує численні завдання для науковців і створює нові виклики для досліджень, зокрема формування динамічних та статичних характеристик електродвигуна електромобіля і оптимізацію систем керування. Одним з передових підходів, який вирішує обидва завдання, є енергоформуєче керування, яке розділяє складну систему на підсистеми, які взаємодіють для досягнення бажаної енергетичної функції. Такий підхід забезпечує асимптотичну стійкість і оптимізує процес, спрямовуючи енергію до мінімуму.

Розглянуто основні методи керування безщітковим двигуном постійного струму (Brushless direct current – BLDC), що живиться від акумуляторної батареї. Проведено порівняльний аналіз сучасних досліджень з оптимізації систем керування. Здійснено синтез системи енергоформуєчого керування енергетично-тяговою системою електромобіля четвертого порядку. Застосовано підхід IDA-PBC, який дав змогу синтезувати оптимальні структури регуляторів. Здійснено налаштування застосовуваного методу шляхом параметричного синтезу та розв’язання оптимізаційної проблеми. Проведено симуляційні дослідження САК в середовищі MATLAB/Simulink. Досліджено структури отриманих регуляторів та їхній вплив на об’єкт керування, обрано оптимальну структуру для забезпечення якісних характеристик привода. Синтезовано структуру ФКВ,

які забезпечують рух замкненої системи до заданої бажаної точки рівноваги з необхідною динамікою системи. Отримані характеристики привода забезпечують оптимальні параметри системи в динамічних та статичних режимах.

Ключові слова: *електромобіль, система керування, енергетичні підходи, енергоформуюче керування, безіттковий двигун.*

Вступ

Електромобілі впевнено закріпилися на сучасному ринку й демонструють незмінний ріст попиту й цікавості серед споживачів. Зумовлено це такими перевагами, як екологічність, економічність, низький рівень шуму, висока динаміка та інші. Такому значному стрибку в розвитку енергетично-тягових систем (ЕТС) електромобіля сприяли суттєві досягнення в таких сферах, як накопичувачі енергії: акумуляторні батареї (АБ), суперконденсатори (СК), паливні комірки (ПК) та інші; систем швидкої зарядки; електродвигунів та силової електроніки [1–2]. У сукупності система привода, що складається з цих елементів, є комплексним об'єктом керування, який ускладнюється кількістю наявних у ньому елементів живлення, складністю керування привідним електродвигуном, а також складністю застосованих у приводі перетворювачів. У сукупності ця проблема ставить завдання з пошуку оптимального рішення щодо вибору системи керування, формування необхідних керуючих впливів на об'єкт керування шляхом синтезу структури регулятора та подальшої її оптимізації. Пропонується застосування енергетичних методів, що базуються на розгляді об'єкта керування, як порт Гамільтонової системи з керованими портами, та застосування принципів пасивного керування, а саме: Passivity-Based Control – Interconnection and damping assignment (PBC-IDA) з подальшим параметричним синтезом для структур регуляторів.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

Системи керування енергетично-тягових систем електромобіля

Зазвичай основні підходи в керуванні приводом електромобілів вважаються складними в застосуванні та реалізації і загалом можна виділити основні 3 типи: орієнтоване на поле керування (Field-oriented control – FOC), або його ще називають векторним керуванням, пряме керування крутним моментом (Direct torque control – DTC) та керування на основі прогнозування моделі (Model predictive control MPC) [3]. Застосування регуляторів, що базуються на прямому керуванні моментом BLDC часто застосовуються в електромобілях великої та середньої потужності. Перевагою застосування регулятора, орієнтованого на поле, є можливість отримання точної фазної напруги з чіткою матрицею розв'язків струмів в обертовій системі координат. Прогнозне керування потребує об'ємних затрат обчислювальних ресурсів, однак, незважаючи на цей факт, дедалі частіше застосовується у керуванні приводом електромобілів, оскільки забезпечує широкий діапазон керування та високу швидкодію системи [4].

У 1971 році Ф. Блазекє вперше презентував FOC, широко застосовуване для керування приводами змінного струму. Відомо дві стратегії векторного керування електродвигуном: пряме та непряме векторне керування. За прямого векторного керування сигнали зворотного зв'язку за потокощепленням та кутом визначаються за допомогою вимірних давачами сигналів струму або напруги. Такий підхід прямо залежить від точності давачів, має підвищену чутливість до параметрів і як наслідок його ефективність різко знижується на низьких швидкостях. Непряме векторне керування здобуло більшого поширення в сфері електромобілів завдяки ширшому діапазону регулювання і швидкісному функціонуванню шляхом керування послаблення потоку поля статора. Керування FOC характеризується тим, що може забезпечити точний вихідний крутний момент привода електромобіля. Існує низка модифікованих регуляторів систем керування, орієнтованих на поле, наприклад максимальний крутний момент на ампер (МТРА), що задовольняє специфічні вимоги електромобілів, таких як оптимізація прискорення. Регулятори, що контролюють послаблення потоку, мають тенденцію

покращувати діапазон регулювання і дають змогу збільшити максимальну швидкість електромобілів. Головним аспектом керування МТРА можна виділити визначення оптимального розташування ротора. Результати інших досліджень демонструють застосування модифікованого FOC для плавної роботи крутного моменту BLDC, які демонструють значне зниження пульсацій електромагнітного моменту [5]. Хороші результати показує застосування FOC-PID системи керування BLDC [6].

Пряме керування крутним моментом використовує момент як основний елемент для регулювання швидкості системи. Цей підхід обирає вектор напруги і здійснює моделювання перетворювача для підтримки заданого значення шляхом порівняння реального значення потоку і моменту електродвигуна із заданими. DTC використовує окремі гістерезисні регулятори для електромагнітного моменту двигуна та потоку магнітного поля статора. Специфікою таких регуляторів моменту є те, що вони є трирівневими, тоді як регулятори потоку є дворівневими. Застосування DTC методу керування BLDC двигуном показують задовільні результати [7–8]. Недоліком таких регуляторів є негативний вплив на загальний коефіцієнт гармонійних спотворень DTC. На додаток до цього в них є небажана змінна частота перемикачів, такі регулятори складні в керуванні та генерують багато шуму на низьких швидкостях. Для оптимізації такого керування і збільшення продуктивності застосовують технологію широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що інтегрується в DTC з метою нівелювання пульсацій електромагнітного моменту.

Широкого поширення в застосуванні набуло модельно-прогнозне керування (MPC). Серед переваг такого керування можна виділити легкість урахування нелінійності об'єкта регулювання та обмежень. Серед недоліків потрібно зазначити значну потребу в обчислюваних ресурсах. Однак розвиток мікропроцесорної техніки поступово вирішує складнощі в реалізації такого підходу. В основі такого підходу виділяють можливість передбачати майбутні стани системи, спираючись на природу силового перетворювача. У MPC існує поняття горизонту прогнозування, що описує фіксовану кількість майбутніх станів на етапі поточного кроку обчислення числового методу. Для уточнення найімовірнішого майбутнього стану системи і формування коректного керуючого впливу на систему застосовується критерій функції вартості. MPC може здійснювати керуючі впливи за прогнозованим струмом, за прогнозованим моментом і за прогнозованим потоком.

Одним з ефективних підходів для керування енергетично-тягових систем електромобіля на основі BLDC є пасивні системи керування [8]. Такі системи керування мають в основі підхід, що базується на описі системи як порт Гамільтонової системи (PCH – Port Controlled Hamiltonian). Такий опис серед переваг має енергетично зрозумілу структуру, що описує реальний фізичний стан системи. Приклади застосувань зазвичай використовують тільки базове пасивне керування [9]. Однак така інтерпретація дає змогу застосувати підхід взаємозв'язків та демпфувань (IDA-PBC). Цей підхід базується на формуванні керуючих впливів шляхом введення певних керуючих взаємозв'язків та демпфувань, які переміщують стан системи в нову точку рівноваги [10]. Однією з найбільших переваг такого регулювання є те, що замкнена система буде асимптотично стійкою. Тому синтез та детальні дослідження систем енергоформуючого керування на основі IDA-PBC є актуальною задачею.

Постановка задачі

Задачею цієї публікації є здійснити синтез та провести аналіз систем енергоформуючого керування методом IDA-PBC енергетично-тягової системи електропривода електромобіля на базі BLDC. Отримати структури регуляторів та дослідити отримані САК в середовищі MatLAB/Simulink.

Виклад основного матеріалу

Як об'єкт керування було обрано малопотужну енергетично-тягову систему електромобіля, структурну схему якого наведено на рис. 1. Джерелом живлення є АБ В, до якої приєднаний DC/DC перетворювач DC-DC1, на виході якого формується напруга V_{int} , до якої під'єднаний BLDC двигун через інвертор напруги VSI.

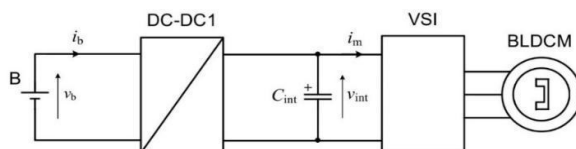


Рис. 1. Структурна схема малопотужної енергетично-тягової системи електромобіля

Подібні системи живлення BLDC було наведено у публікації [8]. Така схема, за наявності DC/DC перетворювача, дає змогу застосовувати АБ нижчої напруги та здійснювати керування швидкістю двигуна, регулюючи напругу ланки постійного струму v_{int} . Порівнюючи підходи до моделювання колекторного двигуна постійного струму з BLDC, можна виділити одну відмінність, яка полягає у збільшенні кількості фаз, що має вплив на загальну модель BLDC [11]. Зміна фаз впливає на резистивну та індуктивну частини схеми. На рис. 2, а зображено повну фазну концепцію BLDC двигуна із симетричним трифазним внутрішнім з'єднанням “wye”. Зменшивши кількість фаз BLDC та замінивши значення опору та індуктивності якоря на еквівалентні, можна розглядати математичну модель BLDC як двигуна постійного струму (рис. 2, б).

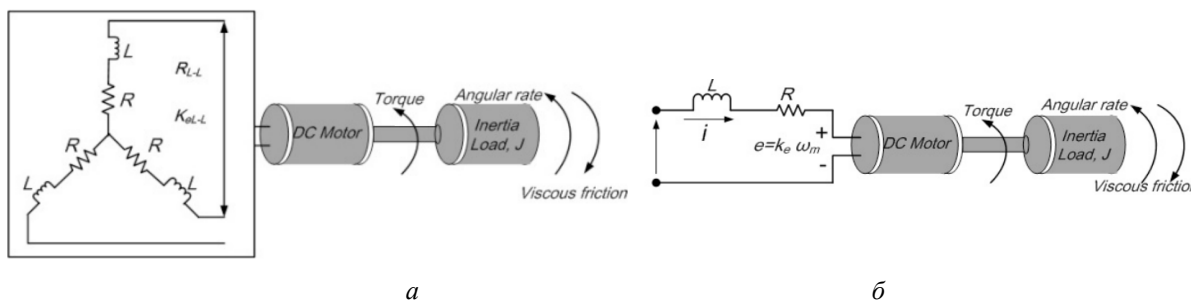


Рис. 2. Еквівалентна схема безщіткового двигуна постійного струму (а) та схема двигуна постійного струму (б)

Зважаючи на вищесказане, загальну математичну модель об'єкта керування можна записати так:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_b = \frac{1}{L_b} [v_b - \mu_b v_{int}] \\ \frac{d}{dt} v_{int} = \frac{1}{C_{int}} [(\mu_b i_b - i_m)] \\ \frac{d}{dt} i_m = \frac{1}{L_a} [v_{int} - k_e \omega - i_m R_a] \\ \frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} [k_e i_m - T_L] \end{cases}, \quad (1)$$

де i_b – струм акумуляторної батареї; v_{int} – напруга ланки DC; i_m – струм ланки DC; $v_b = E_b - i_b R_b$ – напруга акумуляторної батареї; k_e – стала двигуна; ω – кутова швидкість двигуна; T_L – момент навантаження двигуна. L_b – внутрішня індуктивність АБ; C_{int} – ємність конденсатора ланки постійного струму; L_a – індуктивність якоря; J – момент інерції двигуна; μ_b – коефіцієнт заповнення імпульсів.

Щоб застосувати метод РВС-ІДА для процедури синтезу системи, необхідно об'єкт керування розглядати як порт Гамільтонову систему з керованими портами (РСН), яка виглядає так [3]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \nabla H(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \mathbf{u}(t), \quad (2)$$

де $\mathbf{x}(t)$ – вектор змінних стану; $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ – асиметрична матриця взаємозв'язків; $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ – напіввизначена симетрична матриця демпфування; $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ – функція накопичення енергії системи (Гамільтоніан); \mathbf{D} –

діагональна матриця інерційностей; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ – матриця вхідних портів; $\mathbf{u}(t)$ – вектор вхідних змінних системи.

Базуючись на (1) та (2), вектор стану, діагональна матриця інерційностей та вектор енергетичних змінних енергетично-тягової системи отримали такий вигляд:

$$\mathbf{x} = [i_b \quad v_{\text{int}} \quad i_m \quad \omega]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \text{diag} [L_b \quad C_{\text{int}} \quad L_a \quad J], \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = [v_b \quad 0 \quad 0 \quad -T_L]^T. \quad (5)$$

З врахуванням (3) і (4) Гамільтоніан системи описується таким виразом:

$$H(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{D} \mathbf{x} = \frac{1}{2} (L_b i_b^2 + C_{\text{int}} v_{\text{int}}^2 + L_a i_m^2 + J \omega^2). \quad (6)$$

Вектор часткових похідних Гамільтоніана системи з врахуванням (6) отримує вигляд:

$$\nabla H(\mathbf{x}) = \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = [L_b i_b \quad C_{\text{int}} v_{\text{int}} \quad L_a i_m \quad J \omega]^T. \quad (7)$$

З огляду на (1)–(7) матриця взаємозв'язків, матриця демпфувань та матриця портів системи описуються такими виразами:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\mu}) = \begin{bmatrix} 0 & -\mu_b & 0 & 0 \\ \mu_b & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -k_c \\ 0 & 0 & k_c & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}[0 \quad 0 \quad -R_a \quad 0], \quad (9)$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{I}. \quad (10)$$

Метод PBC-IDA полягає в забезпеченні бажаного значення повної енергії системи $H_d(\tilde{\mathbf{x}})$ шляхом формування бажаних взаємозв'язків та демпфувань у системі. Формування бажаних взаємозв'язків та демпфувань спрямоване на отримання таких структур формувачів керуючих впливів (ФКВ) на систему, які забезпечать рух замкненої системи до заданої бажаної точки рівноваги з необхідною динамікою системи. Ця точка формується завданням керування і відповідає бажаній функції повної енергії H_d , яка має в цій точці мінімальне значення.

Динаміка замкненої системи в цьому випадку описується таким векторно-матричним рівнянням:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = [\mathbf{J}_d(\tilde{\mathbf{x}}) - \mathbf{R}_d(\tilde{\mathbf{x}})] \nabla H_d(\tilde{\mathbf{x}}), \quad (11)$$

де $H_d(\tilde{\mathbf{x}}) = 0.5 \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{D} \tilde{\mathbf{x}}$, $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}$ – новий вектор змінних стану, що формується як похибка між заданими координатами, вектором $\bar{\mathbf{x}}$ точкою рівноваги та поточними значеннями відповідних координат, заданих вектором \mathbf{x} .

Бажані значення зв'язків та демпфувань підсистеми досягаються введенням додаткових зв'язків та демпфувань, що можна записати як:

$$\mathbf{J}_d = \mathbf{J} + \mathbf{J}_a, \quad \mathbf{R}_d = \mathbf{R} + \mathbf{R}_a, \quad (12)$$

де \mathbf{J}_a та \mathbf{R}_a – матриці взаємозв'язків та демпфувань, які формують керуючі впливи в системі, тобто фактично є системою керування. Структурний синтез асимптотично стійких PBC систем зводиться до визначення таких структур матриць \mathbf{J}_a та \mathbf{R}_a , які забезпечують тотожність виразів (1) і (11). Виконання цього завдання автори здійснюють шляхом символічного розв'язання векторно-матричного рівняння у середовищі MathCad за авторською методикою [12].

Для структурного синтезу PBC системи керування швидкістю енергетично-тягової системи з BLDC було сформовано вектор усталених значень координат стану в такому вигляді:

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} i_{b0} & v_{int0} & i_{m0} & \omega^* \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де ω^* – завдання кутової швидкості, що поступає на вхід системи керування; i_{b0} , v_{int0} , i_{m0} – усталені значення струму акумуляторної батареї, напруги ланки постійного струму та струму ланки постійного струму відповідно. Коефіцієнт заповнення імпульсів μ_b є четвертим розв’язком векторно-матричних рівнянь, що поряд з i_b , v_{int} та i_m відображають структуру ФКВ, синтезованої РВС системи привода.

Як результат синтезу було отримано множину структур ФКВ для енергетично-тягової системи з BLDC (табл. 1). Базову структуру ФКВ (без введення додаткових взаємозв’язків та демпфувань) для керування DC-DC1 перетворювача отримано у вигляді:

$$\mu_b = \frac{k_e v_b}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L}. \quad (14)$$

Отримані структури ФКВ для різних додатково введених взаємозв’язків у РВС системі для енергетично-тягової системи наведено у табл. 1. Додатковий взаємозв’язок між струмом акумуляторної батареї та швидкістю двигуна j_{14} немає реалізації. З чотирьох можливих додатково введених демпфувань тільки r_{22} та r_{44} корисні під час формування структур ФКВ. Демпфування r_{11} має складну структуру, а r_{22} формує структуру ФКВ, аналогічну до базової (14).

Таблиця 1

Отримані структури ФКВ

	Структура ФКВ
j_{12}	$\mu_b = \frac{k_e v_b + j_{12}(k_e^2 \omega^* - R_a T_L - k_e v_{int})}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L}$
j_{13}	$\mu_b = \frac{k_e v_b - j_{13} k_e i_m}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L - j_{13} k_e i_b}$
j_{23}	$\mu_b = \frac{k_e v_b - j_{23} k_e v_b}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L - j_{23} v_{int}}$
j_{24}	$\mu_b = \frac{k_e v_b - j_{24} R_a v_b}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L - j_{24} R_a v_{int}}$
j_{34}	$\mu_b = \frac{k_e v_b - j_{34} v_b}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L + j_{34}^2 (\omega^* - \omega) + j_{34} (k_e \omega - R_a i_{int} - k_e \omega^*)}$
r_{33}	$\mu_b = \frac{k_e v_b}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L + r_{33} (T_L - i_m)}$
r_{44}	$\mu_b = \frac{k_e v_b}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L + r_{44} (R_a \omega^* - R_a \omega)}$

Було здійснено подальший параметричний синтез регуляторів та дослідження в середовищі MATLAB/Simulink, згідно з комп’ютерною моделлю, наведеної на рис. 3.

Під час комп’ютерного моделювання енергетично-тягової системи з BLDC було використано такі параметри:

АБ: тип – літій-іон, номінальна напруга – 24 В, номінальна ємність – 100 А · год, стан заряду – 80 %, $L_b = 0.5$ мГн; $C_{int} = 0.01$ Ф.

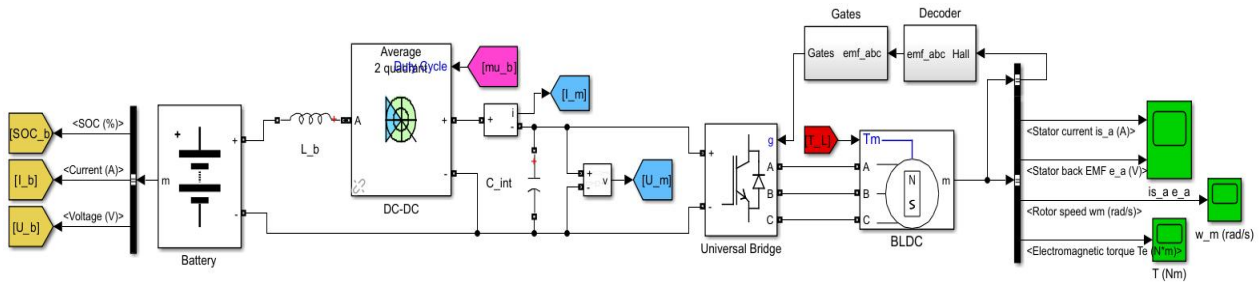


Рис. 3. Комп'ютерна модель енергетично-тягової системи з BLDC

BLDC: модель – FL86BLS125; кількість фаз – 3, кількість полюсів – 8, номінальна напруга – 48 В, номінальна швидкість обертання – 3000 об/хв, номінальний момент – 2.1 Н · м, номінальна потужність – 660 Вт, лінійний активний опір – 0.16 Ом, лінійна індуктивність – 0.3 мГн, стала моменту – 0.11 Н · м/А, зворотна ЕРС – 11.5 В, момент інерції – 2400 г/см².

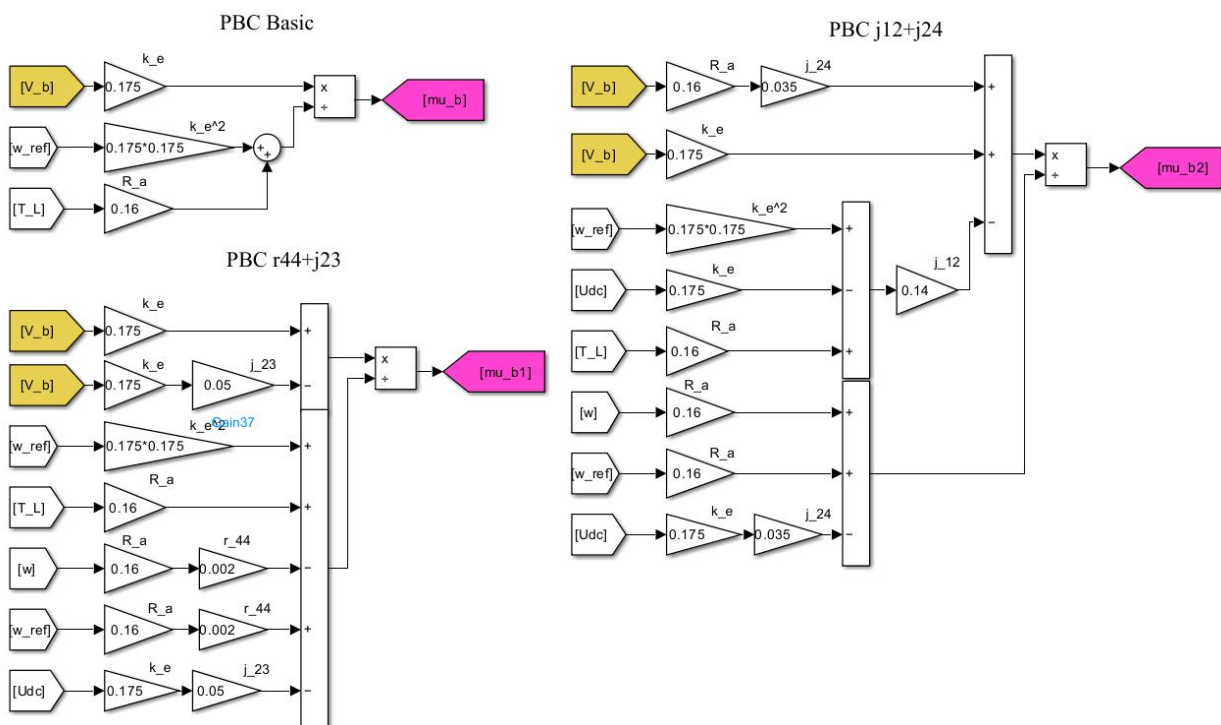


Рис. 4. Реалізація структур ФКВ в середовищі MatLAB/Simulink

Дослідивши отримані ФКВ на комп'ютерній моделі (рис. 4) та здійснивши оптимізацію шляхом параметричного синтезу, найкращі результати показала структура ФКВ, що поєднує в собі демпфування r_{44} та взаємозв'язок j_{23} між напругою ланки DC та струмом ланки DC. Також структура ФКВ з поєднанням взаємозв'язку j_{12} між струмом АБ та напругою ланки DC та взаємозв'язку j_{24} між напругою ланки DC та кутовою швидкістю обертання BLDC показала задовільні результати. Решта структур ФКВ дещо затягують перехідний процес розгону двигуна або призводять до нестабільності системи. Застосовані структури ФКВ мають такий вигляд:

$$\mu_{b,1} = \frac{k_e v_b - j_{23} k_e v_b}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L + r_{44} (R_a \omega^* - R_a \omega) - j_{23} v_{int}}, \quad (22)$$

$$\mu_{b,2} = \frac{k_e v_b + j_{12} (k_e^2 \omega^* - R_a T_L - k_e v_{int}) - j_{24} R_a v_b}{k_e^2 \omega^* + R_a T_L - j_{24} R_a v_{int}}. \quad (23)$$

У результаті параметричної оптимізації систем керування значення коефіцієнтів для ФКВ (22) встановлено на рівні $r_{44} = 0.002$ та $j_{23} = 0.05$. Значення коефіцієнтів для ФКВ (23) встановлено на рівні $j_{12} = 0.14$ та $j_{24} = 0.035$. Критеріями оптимізації було встановлено досягнення найбільшої швидкодії системи з найменшими перерегулюваннями. На систему діє два збуджуючі фактори – сигнал завдання на систему ω^* та статичний момент навантаження на двигун. Для дослідження системи було подано сигнал завдання швидкості, який зображений на рис. 5, г. Статичний момент діє на систему в момент часу 0,15 с, з величиною номінального моменту двигуна $2.1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та знімається у момент часу 0.25 с. Отримані результати досліджень наведено на рис. 5.

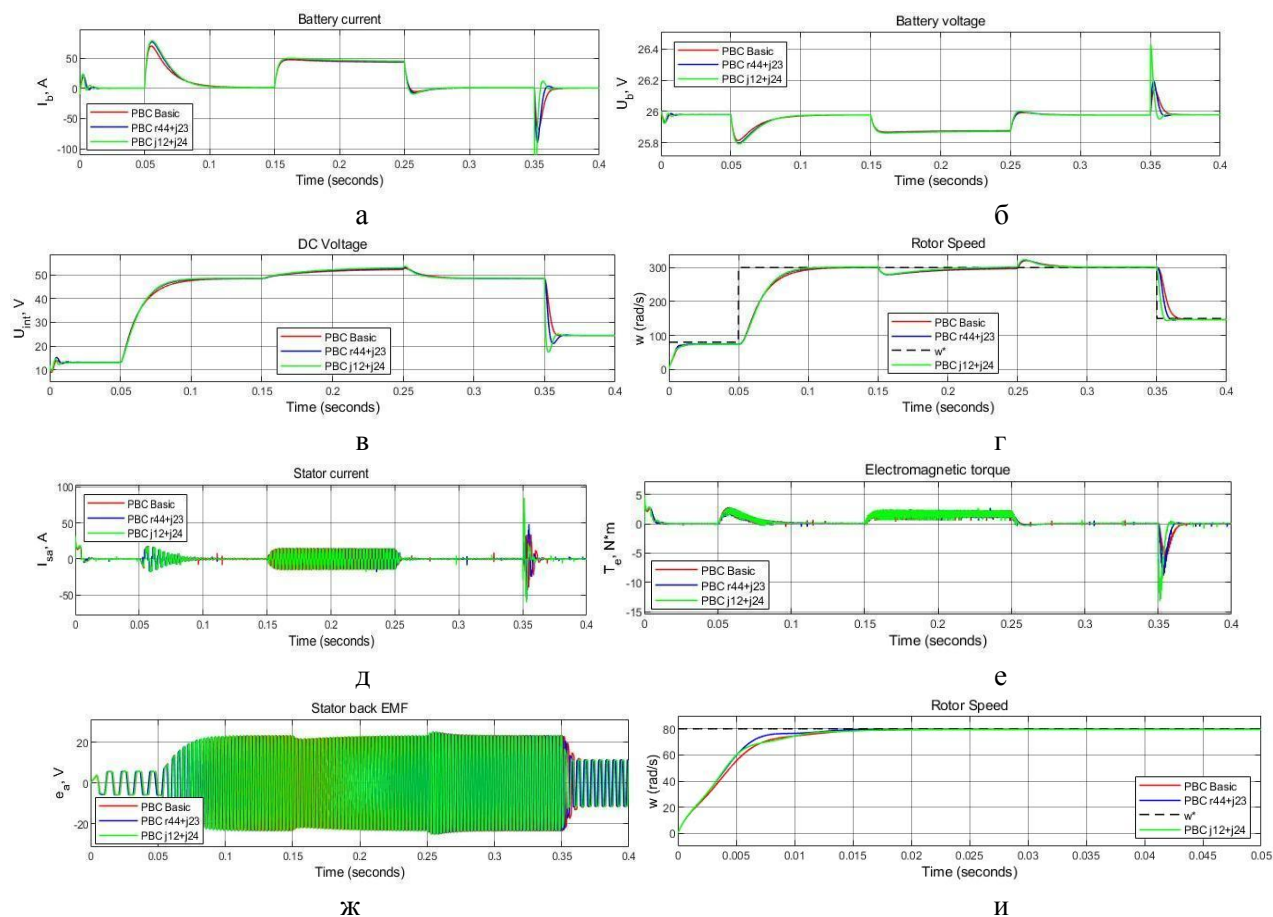


Рис.5. Отримані результати моделювання: а – струм через АБ; б – напруга на АБ; в – напруга на ланці постійного струму; г – швидкість двигуна; д – струм статора; е – електромагнітний момент; ж – зворотна ЕРС; и – швидкість двигуна на відтинку від 0 до 0.02 с

З отриманих залежностей потрібно зазначити, що струм через АБ змінюється плавно для всіх систем (рис. 5, а), стрибки є лише в моменти різкої зміни споживання енергії. Однак ця динаміка проявляється найбільше для ФКВ (23). Напруга на АБ (рис 5, б) є стабільно на одному рівні в межах похибки 0.2 В, найбільша похибка – для систем ФКВ (23), що становить 0.5 В. Регулювання напруги ланки постійного струму u_{int} , що здійснює безпосереднє керування BLDC двигуном (рис. 5, в), автоматично підлаштовується та здійснює керуючі впливи. Аналізуючи залежності швидкості (рис. 5, г), потрібно зазначити, що всі системи здійснюють регулювання згідно із сигналами завдання, системи астатичні. Введення додаткових демпфунів r_{44} та взаємозв'язку j_{23} , для ФКВ (22) та додаткових взаємозв'язків j_{12} та j_{24} , для ФКВ (23), збільшило швидкодію системи, однак присутнє незначне перерегулювання. Під час застосування ФКВ (23) значно збільшилася динаміка системи під час гальмування на нижчій швидкості, під час розгону, а динаміка системи близька до динаміки

системи під керуванням ФКВ (22). Залежності струму фази статора (рис. 5, *д*) та проти ЕРС (рис. 5, *ж*) мають таку форму, зважаючи на конструктивні особливості BLDC двигуна. Електромагнітний момент двигуна (рис. 5, *е*) має пульсуючий характер. Додатково введені демпфування r_{44} та взаємозв'язок j_{23} збільшують гальмівний момент під час зменшення швидкості, однак найбільший гальмівний момент забезпечується під час використання додатково введених взаємозв'язків j_{12} та j_{24} .

Висновки

Результати дослідження демонструють ефективність застосування енергоформуючого керування до енергетично-тягових систем на базі BLDC. Синтезовані ФКВ забезпечують якісні динамічні та статичні характеристики привода. У статті також здійснено огляд наявних методів керування BLDC двигунами. Проведено аналіз систем енергоформуючого керування синтезованих для енергетично-тягової системи привода. Виділено їхні переваги та недоліки. Проведено порівняльні дослідження систем керування на основі PBC-IDA до енергетично-тягових систем на базі реального BLDC двигуна, а також параметричний синтез регуляторів асимптотичної стійкої системи, що дали змогу сформулювати керуючі впливи на об'єкт керування і досягти високих динамічних і статичних характеристик системи.

Структура ФКВ з використанням демпфування швидкості BLDC r_{44} та взаємозв'язком між напругою ланки DC та струмом ланки DC j_{23} демонструє найякісніші результати, оскільки існує баланс між швидкодією системи та перерегулюванням. Синтезований регулятор показує найкращу швидкодію у відпрацюванні сигналу завдання (рис. 5, *и*), однак для її реалізації потрібно 4 давачі: давач швидкості BLDC, 2 давачі напруги: АБ та ланки DC, а також давач моменту навантаження (можливе застосування естиматора). Водночас регулятор, структура ФКВ якого базується на взаємозв'язку між струмом АБ та напругою ланки DC j_{12} та взаємозв'язку між напругою ланки DC та кутовою швидкістю обертання BLDC j_{24} , забезпечує якісне відпрацювання сигналу, однак під час переходу на нижчі швидкості є більше перерегулювання, ніж для попередньої структури ФКВ.

Структури систем з коефіцієнтами демпфування r_{44} та взаємозв'язку j_{23} можуть бути практично використані у реальних системах і подальших наукових дослідженнях. Зокрема, для дослідження енергетично-тягових систем привода як дрібного електротранспорту – електровелосипедів, електросамокатів тощо, а також для привода гідравлічних систем важкої техніки (трактори, вантажні автомобілі).

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження будуть спрямовані на синтез керуючих впливів в системах з розширеними моделями механічної та електричної частин, а також методів оптимізації систем керування ними.

Список джерел

1. Abd Aziz M. A., Saidon M. S., Romli M. I. F., Othman S. M., Mustafa Wan Azani, Manan M. R., Aihsan M. Z. A review on BLDC motor application in electric vehicle (EV) using battery, supercapacitor and hybrid energy storage system: Efficiency and Future Prospects. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2023. Vol. 30. No. 2. Pp. 41–59. DOI: <https://doi.org/10.37934/araset.30.2.4159>.
2. Deepak M., Aruldavid R., Verma R., Sathyasekar K., Barnawi A., Bharatiraja C., Mihet-Popa L. A review of BLDC motor: State of art, advanced control techniques, and applications. *IEEE Access*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>.
3. Sreeram K., Preetha P. A comprehensive review of different electric motors for electric vehicles application. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2024. Vol. 15. Pp. 74. DOI: <https://10.11591/ijpeds.v15.i1.pp74-90>.
4. Megrini M., Gaga A., Mehdaoui Y. Review of electric vehicle traction motors, control systems, and various implementation cards. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 2024. Pp. 238–247. DOI: <https://doi.org/10.37934/araset.30.2.4159>.

5. Geetha V., Thangavel S. Performance analysis of direct torque-controlled BLDC motor using fuzzy logic. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2016. Vol. 7. Pp. 144–151. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v7.i1>.
6. Marek L., Marek Š. Modified field-oriented control for smooth torque operation of a BLDC motor. *2014 ELEKTRO*. 2014. Pp. 180–185. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2014.6847897>.
7. Ebin Joseph T., Sreethumol M. V., Dinesh Pai A. Speed control of BLDC motor drive under DTC scheme using OC with modified integrator. 2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy). 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/tapenergy.2015.7229596>.
8. Shchur I., Lis M., Biletskyi Y. Passivity-based control of water pumping system using BLDC motor drive fed by solar PV array with battery storage system. *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 23. 8184. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14238184>.
9. González H., Duarte-Mermoud M., Pelissier I., Travieso-Torres J. C., Ortega R. A novel induction motor control scheme using IDA-PBC. *Journal of Control Theory and Applications*. 2008. Vol. 6. Pp. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-008-7193-9>.
10. Elangovan G., Vinodhini V., Hussain M., Dhinakaran S. K., Sabarinathan T. Speed control of permanent magnet brushless DC motor using hybrid fuzzy proportional plus integral plus derivative controller. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 117. Pp. 1101–1108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.234>.
11. Shchur I. Z., Biletskyi Y. O. Energy-shaping control of non-linear electromechanical systems with permanent magnet synchronous machines. Monograph. Lviv : Vidavnictvo L'vivs'koi politehniky, 2016. 174 p. (Ukr).
12. Shchur I., Biletskyi Y. Battery current limitation in passivity-based controlled battery/supercapacitor hybrid energy storage system. Proc. 38th IEEE Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018). IEEE. Kyiv, 2018. Pp. 504–510. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477477>.

References

1. Abd Aziz, M. A., Saidon, M. S., Romli, M. I. F., Othman, S. M., Mustafa, Wan Azani, Manan, M. R., & Aihsan, M. Z. (2023). A review on BLDC motor application in electric vehicle (EV) using battery, supercapacitor and hybrid energy storage system: Efficiency and Future Prospects. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 30, 2, 41–59. DOI: <https://doi.org/10.37934/araset.30.2.4159> (in English).
2. Deepak, M., Arulavid, R., Verma, R., Sathyasekar, K., Barnawi, A., Bharatiraja, C., & Mihet-Popa, L. (2022). A review of BLDC motor: State of art, advanced control techniques, and applications. *IEEE Access*. DOI: <https://doi.org/10.1-1.10.1109/ACCESS.2022.3175011> (in English).
3. Sreeram, K., & Preetha, P. (2024). A comprehensive review of different electric motors for electric vehicles application. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 15, 74. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i1.pp74-90> (in English).
4. Megrini, M., Gaga, A., & Mehdaoui, Y. (2024). Review of electric vehicle traction motors, control systems, and various implementation cards. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 238–247. DOI: <https://doi.org/10.37934/araset.30.2.4159> (in English).
5. Geetha, V., & Thangavel, S. (2016). Performance analysis of direct torque-controlled BLDC motor using fuzzy logic. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 7, 144–151. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v7.i1> (in English).
6. Marek, L., & Marek, Š. (2014). Modified field-oriented control for smooth torque operation of a BLDC motor. *2014 ELEKTRO*, 180–185. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2014.6847897> (in English).
7. Ebin, Joseph T., Sreethumol, M. V., & Dinesh, Pai A. (2015). Speed control of BLDC motor drive under DTC scheme using OC with modified integrator. 2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy). DOI: <https://doi.org/10.1109/tapenergy.2015.7229596> (in English).
8. Shchur, I., Lis, M., & Biletskyi, Y. (2021). Passivity-based control of water pumping system using BLDC motor drive fed by solar PV array with battery storage system. *Energies*, 14, 23, 8184. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14238184> (in English).
9. González, H., Duarte-Mermoud, M., Pelissier, I., Travieso-Torres, J. C., & Ortega, R. (2008). A novel induction motor control scheme using IDA-PBC. *Journal of Control Theory and Applications*, 6, 59–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-008-7193-9> (in English).
10. Elangovan, G., Vinodhini, V., Hussain, M., Dhinakaran, S. K., & Sabarinathan, T. (2017). Speed control of permanent magnet brushless DC motor using hybrid fuzzy proportional plus integral plus derivative controller. *Energy Procedia*, 117, 1101–1108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.234> (in English).

11. Shchur, I. Z., & Biletskyi, Y. O. (2016). Energy-shaping control of non-linear electromechanical systems with permanent magnet synchronous machines. Monograph. Lviv : Vidavnictvo L'vivs'koi politehniky (Ukr) (in English).
12. Shchur, I., & Biletskyi, Y. (2018). Battery current limitation in passivity-based controlled battery/supercapacitor hybrid energy storage system. Proc. 38th IEEE Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018). IEEE. Kyiv, 504–510. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477477> (in English).

Yu. O. Biletskyi

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
yurii.o.biletskyi@lpnu.ua

Yu. V. Lompart

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
yurii.v.lompart@lpnu.ua

M. A. Maliar

Lviv Polytechnic National University,
Department of Automated Design Systems,
mykola.a.maliar@lpnu.ua

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF ENERGY-SHAPING CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLE ENERGY TRACTION SYSTEMS BASED ON BLDC MOTOR

© *Biletskyi Yu. O., Lompart Yu. V., Maliar M. A., 2024*

Electromobility is rapidly advancing in modern society, driven by continuous development in energy storage systems, innovations in the design of highly efficient electric motors, and advancements in power electronics. This progress addresses numerous challenges for researchers while introducing new opportunities for further studies, particularly in shaping the dynamic and static characteristics of electric vehicle motors and optimizing control systems. One of the advanced approaches that tackles both tasks is energy-shaping control, which divides complex systems into interacting subsystems to achieve a desired energy function. This method ensures asymptotic stability and partially solves the optimization problem by directing energy towards a minimum.

This paper examines the primary control methods for a brushless direct current (BLDC) motor powered by a battery. A comparative analysis of modern research on control system optimization is conducted. The synthesis of an energy-shaping control system for a fourth-order electric vehicle energy traction system is carried out. The IDA-PBC approach is applied, allowing for the synthesis of optimal controller structures. The method is fine-tuned through parametric synthesis and the solution of an optimization problem. Simulation studies of the control system were performed in MATLAB/Simulink. The structures of the synthesized controllers and their impact on the control object were studied, leading to the selection of an optimal structure to ensure high-quality drive characteristics. The synthesized control structures ensure that the closed-loop system moves to the desired equilibrium point with the required system dynamics. The obtained drive characteristics provide optimal system parameters in both dynamic and static modes.

Keywords: electric vehicle, control system, energybased approaches, energy shaping control, brushless DC motor.