

ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ПОВНІСТЮ КЕРОВАНОГО ГІБРИДНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

С.М. Пересада*, докт. техн. наук, **Є.О. Ніконенко****, **М.М. Желінський*****, **В.С. Решетник******
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: sergei.peresada@gmail.com

В роботі представлено результати експериментальних досліджень та рекомендації щодо формування динамічних режимів гібридного джерела живлення для електричних транспортних засобів, що містить акумуляторні батареї та блок суперконденсаторів. Відповідно до розробленої методики тестування струм навантаження сформовано на основі заданих діаграм моменту та швидкості, які відповідають руху типового електричного транспортного засобу. Показано, що системи гібридних джерел живлення з фіксованим налаштуванням фільтра розподілу частот забезпечують кращі умови роботи акумуляторних батарей порівняно з акумуляторним живленням, проте не гарантують ефективний розподіл струмів для всіх динамічних режимів руху транспортного засобу. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: гібридне джерело живлення, електричний транспортний засіб, фільтр розподілу частот, формування динамічних режимів

Вступ. Перехід від транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння до повністю електричних транспортних засобів (ЕТЗ) стримується недовговічністю акумуляторних батарей (АКБ), а також зниженням корисної ємності та терміну їхньої служби внаслідок дії швидкозмінного та пікового навантаження, яке є типовим для ЕТЗ [1, 2]. Повністю керовані гібридні джерела живлення (ГДЖ) на основі АКБ та блоку суперконденсаторів (СК) дають змогу покращити умови роботи АКБ. В таких системах АКБ постачають повільно змінну потужність, тоді як СК працюють в перехідних режимах як буферні накопичувачі [1-3]. Блок СК прибирає з АКБ пікове швидкозмінне навантаження та навантаження вище номінального, що подовжує термін дії АКБ [3, 4]. Незважаючи на інтенсивні дослідження ГДЖ для автономних ЕТЗ, теорія керування процесами енергообміну між АКБ, блоком СК та тяговим двигуном перебуває на початковій стадії розвитку, що обумовлюється як складністю задач керування, так і обмеженими можливостями використання аналітичних методів синтезу алгоритмів керування та їхнього дослідження [1, 3-5]. В той же час верифікація теоретичних результатів в умовах реального ЕТЗ потребує значних капіталовкладень і не є раціональною на початкових стадіях розробки, тому їх зазвичай виконують на модельних прикладах шляхом експериментальних імітаційних досліджень [2, 6].

Одним з найбільш важливих питань керування ГДЖ електромеханічних систем ЕТЗ є розподіл струмів між АКБ та СК в перехідних режимах, який здійснюється шляхом розділення струму джерела живлення на повільну та швидку складові за допомогою, наприклад, спеціальної конфігурації фільтра розподілу частот (ФРЧ) [1, 2, 4]. Рішення [4] є ефективним для накопичувачів енергії мереж живлення зі ступінчатою зміною навантаження. Для розділення струмів у [7] використовується алгоритм, що мінімізує зміну стану заряду АКБ. У [8] застосовано обмежувач похідної струму АКБ, який концептуально є аналогом ФРЧ. Результати досліджень [1, 4, 7, 8] свідчать, що загально визнаного рішення задач формування динамічних режимів ГДЖ для ЕТЗ до теперішнього часу не знайдено. Більшість досліджень базується на результатах математичного моделювання без експериментального підтвердження і верифікації математичних моделей АКБ і СК, параметри і структура яких залежать не тільки від їхнього типу, але й режимів навантаження у складі електромеханічної тягової системи. У [2, 6] представлено результати розробки станції швидкого прототипного тестування, верифікації математичних моделей АКБ і СК, а також розробки алгоритмів і дослідження динамічних властивостей векторно-керованих електроприводів, які підтвердили, що апаратна частина і програмне забезпечення дають змо-

© Пересада С.М., Ніконенко Є.О., Желінський М.М., Решетник В.С., 2020
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-8948-722X>; ** <https://orcid.org/0000-0003-2379-5566>;
*** <https://orcid.org/0000-0003-4862-1802>; **** <https://orcid.org/0000-0002-8428-0446>

гу проводити повномасштабні експериментальні дослідження алгоритмів керування тяговими електро-механічними системами ЕТЗ з гібридними джерелами живлення.

Дослідження динаміки ГДЖ, результати яких підтверджено експериментально, отримано в умовах ступінчатого навантаження [2, 4] або навантаження, що відповідає графіку руху ЕТЗ за так званим циклом “driving cycle” [8]. Перші дозволяють оцінити динамічні властивості в умовах стандартних для систем керування впливів, але не відповідають умовам навантаження у складі тягового електроприводу, в той час як другі можуть надати лише інтегровану оцінку без визначення впливу окремих ділянок руху на ефективність розподілу струмів.

Метою роботи є: а) розробка методики дослідження динамічних режимів ГДЖ шляхом експериментального тестування та математичного моделювання, яка забезпечує формування навантажень у відповідності до типових складових діаграм руху ЕТЗ з векторно-керованими асинхронними і синхронними електроприводами; б) аналіз ефективності розподілу струмів ГДЖ у порівнянні з тільки акумуляторним живленням, розробка рекомендацій щодо налаштувань ФРЧ; в) оцінка точності стандартних моделей АКБ та СК в умовах струмового керування, яке реалізується повністю керованими ГДЖ. Дослідження виконано на платформі швидкого прототипного тестування ГДЖ, в якій на відміну від [2], застосовано літій-іонні АКБ. За технологію розподілу струмів обрано таку, що розроблено у [4] на основі ФРЧ з фіксованим налаштуванням, яка на сьогодні вважається найбільш прогресивною.

1. Математична модель гібридного джерела живлення, блоку суперконденсаторів та акумуляторних батарей і критерії порівняння. Для дослідження енергорозподілу в ГДЖ використано математичну модель повністю керованого ГДЖ на базі двох підвищувальних DC-DC перетворювачів [2]

$$\dot{V}_{dc} = (p_{bt}i_{bt}/2 + p_{sc}i_{sc}/2 - i_L)/C, \quad \dot{i}_{bt} = (-Ri_{bt} + V_{bt} - V_{dc}p_{bt}/2)/L, \quad \dot{i}_{sc} = (-Ri_{sc} + V_{sc} - V_{dc}p_{sc}/2)/L, \quad (1)$$

де $dx/dt = \dot{x}$, $p_{bt}, p_{sc} \in [0;2]$ – сигнали керування ключами; V_{dc} – напруга ланки постійного струму; $V_{bt}, i_{bt}, V_{sc}, i_{sc}$ – напруги та струми АКБ та СК відповідно; i_L – струм навантаження; C – вихідна ємність; L, R – індуктивність та опір дроселів.

Модель Теневіна з модифікаціями Трембле для літій-іонних АКБ має вигляд [9]

$$E_{bt} = N_s E_0 - K_1 Q \left(\frac{1-u}{Q-i_t} + \frac{u}{i_t + k_c Q} \right) i_f - \frac{K_2 Q}{Q-i_t} N_p i_t + N_s A e^{-N_p B i_t}, \quad \dot{i}_t = \frac{i_{bt}}{3600}, \quad u = \begin{cases} 0, & i_f \geq 0, \\ 1, & i_f < 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$V_{bt} = E_{bt} - i_{bt} R_i N_s / N_p, \quad \dot{i}_f = (-i_f + i_{bt}) / T_p,$$

де ідентифіковані експериментально параметри моделі АКБ типу Swing 5300: $E_0=3.65$ В – ідеальна ЕРС; E_{bt} – реальна ЕРС; $K_1=8$ В/(А·год) – поляризаційна константа; $K_2=8$ мОм – поляризаційний опір; $Q=5.3$ А·год – максимальна ємність; i_t – витрачений заряд; $k_c=0.01$ – коефіцієнт споживаного струму при заряді; $T_p=30$ с – поляризаційна постійна часу; i_f – фіктивний струм, що визначає вплив поляризації; $A=0.56$ В – амплітуда експоненційної зони; $B=0.2$ (А·год)⁻¹ – зворотна стала часу експоненційної зони; $R_i=30$ мОм – внутрішній активний опір; N_s – кількість послідовних елементів; N_p – кількість паралельних віток.

Модель використаного блоку СК з 40 послідовних елементів типу ESHSR-0005C0-002R7 [2]

$$\dot{V}_C = (-V_C + V_{sc}) / C_{sc} R_s, \quad \dot{V}_{sc} = (V_C - R_s i_{sc}) / (1 - R_s / R_p), \quad (3)$$

де V_{sc} – вихідна напруга блоку СК; V_C – напруга на еквівалентній ємності $C_{sc}=1.2$ Ф; послідовний опір $R_s=0.64$ Ом, який характеризує активні втрати; паралельний опір $R_p=11$ кОм, що описує саморозряд.

Для порівняння умов роботи АКБ в системах живлення застосовано загально прийняті критерії, які найбільше впливають на деградацію АКБ [3, 10]: а) максимальне значення струму в одному елементі АКБ $i_{1c}=i_{bt}/N_p$; б) швидкість зміни струму АКБ. Відмітимо, що визначення допустимої швидкості зміни струму АКБ та її вплив на ресурсні показники до цього часу не отримало кількісних оцінок.

2. Алгоритм керування гібридним джерелом живлення, розроблений авторами у [2], включає:

– регулятори струму АКБ та СК

$$p_{bt} = 2 \left(V_{bt} - Ri_{bt}^* + Lk_{i1} \tilde{i}_{bt} + Lk_{i2} x_{bt} \right) / V_{dc}, \quad \dot{x}_{bt} = \tilde{i}_{bt}, \quad p_{sc} = 2 \left(V_{sc} - Ri_{sc}^* + Lk_{i1} \tilde{i}_{sc} + Lk_{i2} x_{sc} \right) / V_{dc}, \quad \dot{x}_{sc} = \tilde{i}_{sc}, \quad (4)$$

де $\tilde{i}_{bt} = i_{bt} - i_{bt}^*$, $\tilde{i}_{sc} = i_{sc} - i_{sc}^*$ – похибки відпрацювання струмів; i_{bt}^* , i_{sc}^* – задані струми АКБ і СК відповідно; $k_{i1}>0$, $k_{i2}>0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму;

– нелінійний ПІ-регулятор напруги ланки постійного струму

$$i_{\Sigma}^* = C(-k_v \tilde{z} - k_{vi} x_v) / (2V_{bt}), \quad \dot{x}_v = \tilde{z}, \quad (5)$$

де i_{Σ}^* – сумарний заданий струм, необхідний для інвертора; $k_v > 0$, $k_{vi} > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора напруги; $\tilde{z} = z - V_{dc}^{*2}$ – похибка регулювання напруги, $z = V_{dc}^2$;

– нелінійний ФРЧ, який складається з фільтра низьких частот (ФНЧ) та алгоритму формування заданого струму СК [4]

$$i_{bt}^* = (-i_{bt}^* + i_{\Sigma}^*)/T_f, \quad i_{sc}^* = V_{bt} (i_{\Sigma}^* - i_{bt}^*)/V_{sc}. \quad (6)$$

Алгоритм (4) – (6) потребує вимірювання напруг АКБ та СК та забезпечує: а) асимптотичне регулювання напруги ланки постійного струму; б) асимптотичне відпрацювання заданих струмів АКБ та СК; в) обмеження максимального значення струму АКБ; г) обмеження швидкості зміни струму АКБ.

3. Методика тестування, результати експерименту і моделювання. Дослідження процесів енергообміну між АКБ та СК виконано на станції швидкого прототипного тестування, схему якої наведено на рис. 1. Станція складається з АКБ, блоку СК, двох DC-DC перетворювачів та емулятора

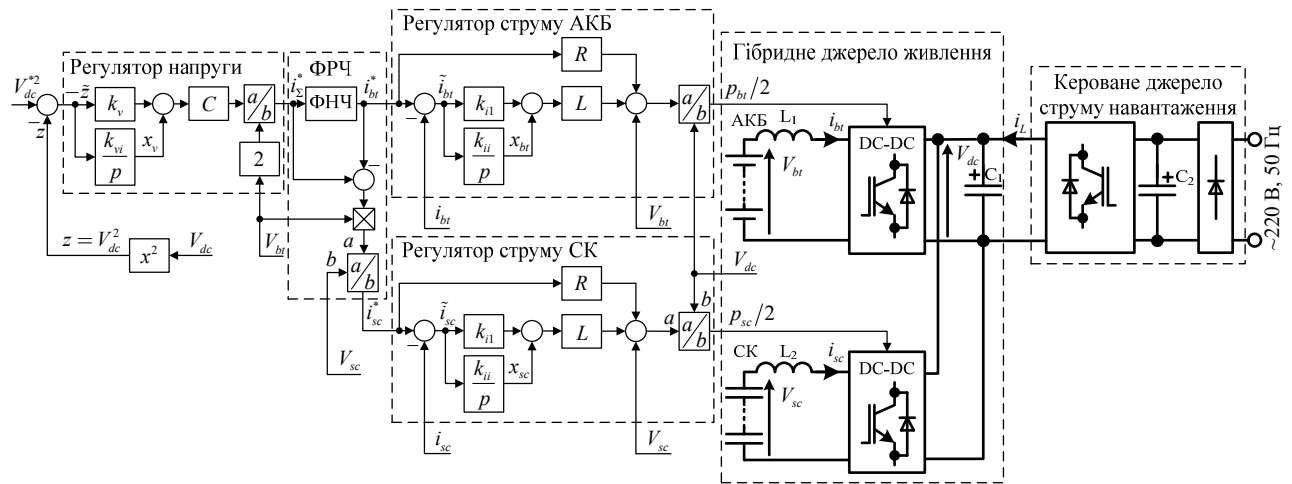


Рис. 1

руху ЕТЗ на основі керованого джерела струму, яке емулює струм навантаження для ГДЖ (струм тягового електропривода). Для порівняння двох блоків АКБ (одного – у складі ГДЖ, а другого – у складі акумуляторного живлення) необхідно, щоб їхні потужності були однакові. Для ГДЖ використано $N_s=13$ послідовних елементів та $N_p=2$ паралельних віток. Для випадку акумуляторного живлення

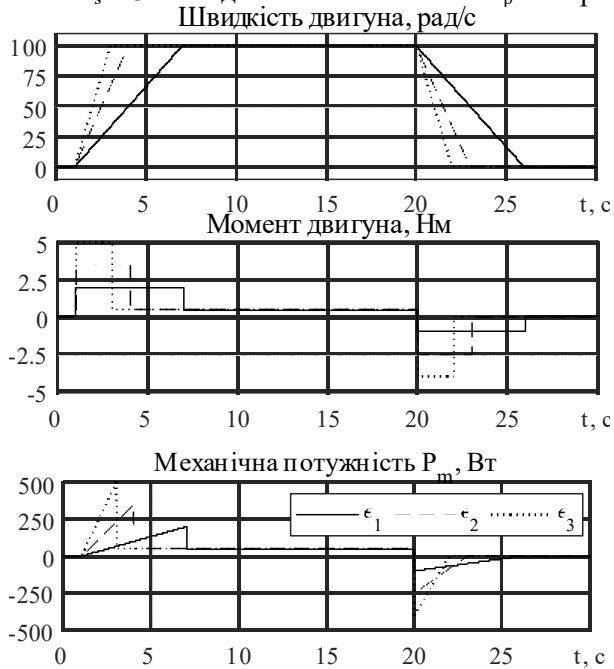


Рис. 2

використано $N_s=26$ послідовних елементів та $N_p=1$ паралельна вітка. Алгоритм керування DC-DC перетворювачами, а також джерелом струму навантаження, реалізовано на розробленому контролері на основі цифрового сигнального процесору TMS320F28335.

На відміну від дослідження [4], де використовується постійне резистивне навантаження, та дослідження [2], в якому навантаження здійснюється стрибкоподібним накиданням-скиданням струму, методика, що пропонується, передбачає формування струму навантаження на основі розрахунку, виходячи з типових діаграм руху ЕТЗ. В процесі дослідження розподілу струмів у системах живлення використано послідовність керування для блоку навантаження, яку наведено на рис. 2: 1) емулюється розгін ЕТЗ в умовах різних заданих прискорень ϵ ; 2) двигун працює з постійною швидкістю, покриваючи постійні втрати; 3) двигун гальмується. Вихідна механічна потужність P_m перераховується до електричної потужності P_a з урахуванням втрат, які

присутні в двигуні. Струм навантаження дорівнює $i_L = P_a / V_{dc}$. Така методика розрахунку струму навантаження може застосовуватись для всіх типів тягових електроприводів з векторно-керованими двигунами змінного струму.

Для дослідження визначено три значення прискорення: $\varepsilon_1=16.7 \text{ рад/с}^2$, $\varepsilon_2=33.3 \text{ рад/с}^2$ та $\varepsilon_3=50 \text{ рад/с}^2$, які відповідають мінімальному, середньому та максимальному прискоренню емульованого ЕТЗ. Коефіцієнти регуляторів у всіх тестах прийнято наступними: для регуляторів струму (4) $k_{i1} = 600$, $k_{i2} > k_{i1}^2/4$; для регулятора напруги (5) $k_v = 100$, $k_{vi} > k_v^2/4$. Початкова напруга блоку СК дорівнює 90 В, задана вихідна напруга $V_{dc}^* = 100 \text{ В}$. Метою експериментальних досліджень є встановлення впливу налаштувань ФРЧ на розподіл струмів в ГДЖ при різних значеннях прискорення ЕТЗ, а також покращення умов роботи АКБ у складі ГДЖ порівняно з чисто акумуляторним живленням.

Дослідження налаштування ФРЧ. Графіки перехідних процесів за умови розгону ЕТЗ з прискореннями $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ наведено на рис. 3. Суцільні лінії відповідають сумарному заданому струму i_Σ^* , який необхідний для тягового двигуна ЕТЗ, штриховими та пунктирними лініями – струм АКБ i_{bt} за умови різного налаштування ФРЧ. Додатній напрямок струму відповідає розряду ГДЖ. Початкове налаштування ФРЧ відповідає $T_f = 1.0 \text{ с}$ для всіх випадків прискорення. Струм СК розраховується відповідно до (6).

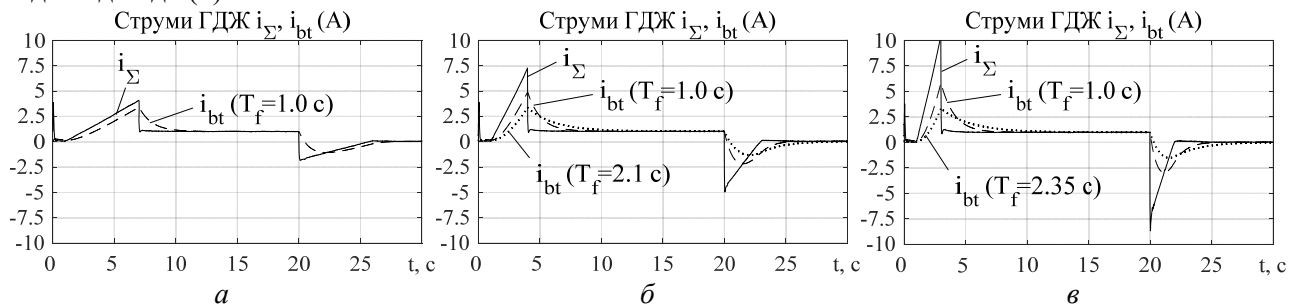


Рис. 3

З графіків видно, що фіксоване налаштування не забезпечує обмеження струму АКБ на певному рівні для кожного режиму роботи ЕТЗ. З метою обмеження максимального струму АКБ на однаковому рівні ($i_{bt} = 3.3 \text{ А}$) ФРЧ було переналаштовано для випадків прискорень ε_2 та ε_3 до рівня $T_f = 2.1 \text{ с}$ та $T_f = 2.35 \text{ с}$ відповідно. Необхідно відмітити, що інтегральне значення i_{bt} залишається постійним при розгоні та гальмуванні, тобто АКБ зберігає/витрачає однакову кількість енергії незалежно від налаштування ФРЧ. З аналізу рис. 3 випливає, що різні прискорення $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ потребують відповідного налаштування ФРЧ; процеси розгону, виходу на постійну швидкість та сповільнення ЕТЗ потребують різного налаштування навіть в умовах однієї діаграми швидкості.

З результатів тестування для різних значень початкової напруги СК встановлено важливу особливість роботи ГДЖ. Формування заданого струму СК відповідно до (6) забезпечує такий розподіл струмів, що блок СК постачає саме те значення миттєвої потужності, яке відповідає поточному рівню його напруги. Для систем ГДЖ з фіксованим налаштуванням ФРЧ, а саме для блоку СК, немає можливості отримати більше енергії від ЕТЗ, ніж було віддано. Потенційно адаптація ФРЧ дасть змогу перевести всю енергію рекуперації до блоку СК, а потім розряджати його на АКБ з лімітованим значенням струму та швидкістю заряду, або використати накопичену енергію для інтенсивного розгону без залучення АКБ.

Дослідження розподілу струмів для ГДЖ та акумуляторного живлення. Порівняння умов роботи АКБ у разі живлення ЕТЗ від ГДЖ та тільки від АКБ виконано для максимального прискорення ε_3 зі сталою часу $T_f = 2.35 \text{ с}$. Результати моделювання цього режиму зображено на рис. 4, а, де суцільні лінії показують сумарний заданий струм, штрихові лінії – струм АКБ, а пунктирні лінії – струм СК. На рис. 4, б суцільні лінії показують струм в одному елементі АКБ для випадку живлення від ГДЖ, а штрихові лінії відповідають струму в елементі АКБ за умови акумуляторного живлення.

Відмітимо, що струм навантаження i_L для живлення тільки від АКБ дорівнює струму АКБ, проте він у два рази менший за i_Σ^* для ГДЖ, адже напруга елементів АКБ дорівнює напрузі ланки постійного струму, а для випадку ГДЖ – напруга елементів АКБ у два рази менша. Для акумуляторного живлення використано одну паралельну вітку елементів, тому в усіх елементах струм дорівнює $i_{1c} = i_{bt}$. Для ГДЖ застосовано 2 вітки, тому струм в елементі АКБ $i_{1c} = i_{bt}/2$.

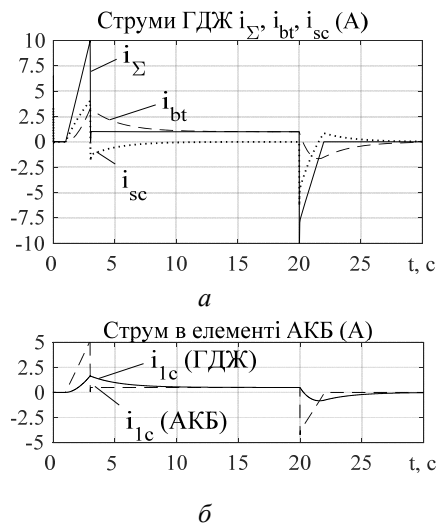


Рис. 4

на кожній із ділянок руху. Підтверджено, що системи ГДЖ на основі ФРЧ з фіксованим налаштуванням забезпечують кращі умови роботи АКБ в перехідних процесах, ніж для випадку акумуляторного живлення ЕТЗ. Водночас, загальноприйняте фіксоване налаштування не гарантує ефективного розподілу струмів між АКБ та СК для всіх динамічних режимів руху ЕТЗ, що потребує адаптації параметрів ФРЧ відповідно до динамічних режимів тягового електропривода, а саме розгону, виходу на постійну швидкість та сповільнення ЕТЗ. За результатами досліджень динамічних режимів ГДЖ встановлено, що стандартні моделі ГДЖ, АКБ та СК на основі обґрунтованих припущень поєднують простоту та достатню точність для дослідження процесів енергообміну в керованих ГДЖ.

Відзначимо поведінку ГДЖ при гальмуванні, що починається у момент часу $t = 20$ с. Спочатку перехідний струм заряджає блок СК. Після того, як сумарний струм i_{Σ}^* та i_{bt} стають рівними ($t \approx 22$ с), навантаження спадає швидше, ніж може змінитися струм АКБ. Тому СК постачають зарядний струм до АКБ для підтримки гладкої форми i_{bt} . З порівняння рис. 4 та рис. 3, випливає, що використані моделі ГДЖ та джерел живлення забезпечують достатню точність моделювання. З аналізу рис. 4 випливає, що адаптивне налаштування ФРЧ може потенційно зменшити струм в елементах АКБ: для показаного випадку струм i_{1c} зменшено більше, ніж втричі до 1.5 А для живлення від ГДЖ у порівнянні з 5 А – для живлення від АКБ.

Висновки. Розроблена методика дослідження динамічних процесів енергообміну між джерелами живлення і тяговим електроприводом дає змогу формувати струми навантаження, які відповідають типовим діаграмам руху ЕТЗ і дають можливість оцінювати ефективність розподілу струмів між АКБ та СК

1. Hemmati R., Saboori, H. Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 65. Pp. 11-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.029>
2. Peresada S., Nikonenko Y., Kovbasa S., Kuznietsov A., Pushnitsyn D. Rapid prototyping station for batteries-supercapacitors hybrid energy storage systems. *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019)*. Ukraine. Kyiv. April, 16-18. 2019. Pp. 826-831. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783731>
3. Zhang C., Min H., Yu Y., Wang D., Luke J., Opila D., Saxena S. Using CPE function to size capacitor storage for electric vehicles and quantifying battery degradation during different driving cycles. *Energies*. 2016. Vol. 9. Pp. 1-23.
4. Kollimalla S. K., Mishra M. K., Ukil A., Gooi H. B. DC grid voltage regulation using new HESS control strategy. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. April, 2017. Vol. 8. No 2. Pp. 772-781.
5. Peresada S., Kovbasa S., Pristupa D., Pushnitsyn D., Nikonenko Y. Nonlinear control of voltage source AC-DC and DC-DC boost converters. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universiteta Kharkivskii politekhnichnyi instytut. Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriia ta praktyka. Sylova elektronika ta energoefektyvnist*. Kharkiv. 2017. No 27. Pp. 84-88. (Rus)
6. Peresada S., Kovbasa S., Nikonenko Y., Bozhko S. Concept of experimental research for electrical vehicle electromechanical systems with hybrid energy storages. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 57-60. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2018.05.057>
7. Zhang S., Xiong R., Zhou X. Comparison of the topologies for a hybrid energy-storage system of electric vehicles via a novel optimization method. *Sci. China Technological Sci*. 2015. Vol. 58. No 7. Pp. 1173-1185.
8. Akar F., Tavlasoglu Y., Vural B. An energy management strategy for a concept battery/ultracapacitor electric vehicle with improved battery life. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2017. Vol. 3. No 1. Pp. 191-200.
9. Tremblay O. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electric Vehicle Journal*. May, 2009. Vol. 3. Pp. 289-298.
10. Keil P., Jossen A. Impact of dynamic driving loads and regenerative braking on the aging of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of the electrochemical society*. 2017. Vol. 164. No 13. Pp. A3081-A3092.

ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМОГО ГИБРИДНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С.М. Пересада, докт. техн. наук, Е.А. Никоненко, Н.Н. Желинский, В.С. Решетник
НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,
e-mail: sergei.peresada@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментальных исследований и рекомендации по формированию динамических режимов гибридного источника питания для электрических транспортных средств, содержащего аккумуляторные батареи и блок суперконденсаторов. Ток нагрузки сформирован на основе заданных диаграмм момента и скорости, которые соответствуют движению электрического транспортного средства. Показано, что системы гибридных источников питания с фиксированной настройкой фильтра распределения частот обеспечивают лучшие условия работы аккумуляторных батарей в сравнении с аккумуляторным питанием транспортного средства. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: гибридный источник питания, электрическое транспортное средство, фильтр распределения частот, формирование динамических режимов

FORMATION OF DYNAMIC MODES OF FULL-CONTROLLED HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

S. Peresada, Ye. Nikonenko, M. Zhelinskyi, V. Reshetnyk
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Peremohy ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine,
e-mail: sergei.peresada@gmail.com

In this paper, the results of the experimental investigations of the dynamic modes of the hybrid energy storage system for electric vehicles are shown which is based on the batteries and supercapacitors. The recommendations on the formation of dynamical modes are presented. The load current is formed based on diagrams of the motor torque and speed which correspond to the movement of a typical electric vehicle. It is experimentally shown that hybrid energy storage systems with a fixed configuration of the decoupling filter improve the batteries operation conditions, comparing with the battery-only source, but cannot guarantee effective currents distribution for all dynamic modes of an electric vehicle. References 10, figures 4.

Keywords: hybrid energy storage system, electric vehicle, distribution filter, dynamic modes forming

Надійшла 28.02.2020
Остаточний варіант 14.04.2020