

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.04.067:621.313.3

А. М. МУХА^{1*}, М. О. КОСТІН², О. Я. КУРИЛЕНКО³, Г. В. ЦИПЛЯ⁴

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

²Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

³Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта kyrylenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

⁴Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 043 06 29, ел. пошта glebtsyplia@gmail.com, ORCID 0000-0002-5568-605X

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета. У науковій роботі необхідно проаналізувати розширення діапазону навантаження та здійснення рекуперативного гальмування (РГ) електричного приводу постійного струму шляхом застосування суперконденсаторних накопичувачів електроенергії. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використовуються методи теорії електроприводу, імпульсної електротехніки та методика розрахунку перехідних електромагнітних процесів у лінійних електричних колах при наявності в них суперконденсаторів. **Результати.** Здійснено суттєве збільшення жорсткості механічної та електромеханічної характеристик двигунів послідовного збудження, що дає можливість використання електроприводу постійного струму при навантаженні, значно меншому, ніж 15–20 % від номінального. Виконано чисельні розрахунки процесу дії суперконденсаторного накопичувача електроенергії при різкому зменшенні навантаження тягового електродвигуна електровоза постійного струму. Обґрунтовано можливість РГ електроприводу постійного струму з двигуном послідовного збудження. Виконано розв'язання рівнянь процесу зарядження й розрядження суперконденсаторного накопичувача в режимі РГ. Досліджено вплив величини ємності на характер підтримання в часі струму збудження електродвигуна в режимі малих навантажень. **Наукова новизна.** Розроблено теоретичні підходи щодо перетворення м'яких (механічних та електромеханічних) характеристик у жорсткі електродвигунів постійного струму послідовного збудження. Вперше запропоновано й обґрунтовано новий, комбінований, метод РГ двигунів послідовного збудження. Подальший розвиток отримали методи оцінки параметрів блока ємнісного накопичувача з урахуванням критеріїв надійної паралельної роботи суперконденсаторів із обмоткою збудження електродвигуна. **Практична значимість.** Запропоноване та обґрунтоване авторами перетворення м'яких характеристик у жорсткі дозволяє використовувати загальнопромислові електроприводи з двигунами послідовного збудження й при малих навантаженнях, а в тягових електроприводах – знизити інтенсивність буксування колісних пар електрорухомого складу. Розроблена методика розв'язання перехідних рівнянь дає можливість врахувати випадковий характер зміни напруги на двигуні в режимах зарядження та розрядження суперконденсаторного накопичувача. Запропонований комбінований метод РГ робить можливим здійснення РГ й при малих швидкостях обертання якоря електродвигуна, тим самим підвищуючи енергоефективність експлуатації електроприводів цього типу.

Ключові слова: електропривод; накопичувач; рекуперация; суперконденсатор; характеристика електродвигуна; струм; процес; електроенергія

Вступ

Завдяки м'якості механічної $\omega(M)$ і електромеханічної $\omega(I_y)$ характеристик, а також великим пусковому і перевантажному моментам, двигуни постійного струму з послідовним збудженням отримали широке застосування [4, 9]. Зокрема їх використовують в електроприводах підйомно-транспортних механізмів, паперово-виробничих машинах, неперервних приводах валків металургійних прокатних станів, в механічних карусельних станках, в роботах, маніпуляторах, компресорах, повітрорудних і бурових установках, а також в електроприводах залізничного магістрального, промислового і міського електротранспорту. І в той же час, якраз м'якість характеристик зазначених електродвигунів обумовлює їх суттєві недоліки, а саме, в електроприводах загальнопромислових механізмів двигуни послідовного збудження неможливо використовувати при навантаженнях нижче 15–20 % від номінального. Це обумовлене тим, що, згідно характеристик $\omega(I_y)$ і $\omega(M)$, при малих навантаженнях, коли струм якоря I_y і обертовий момент M близькі до нуля, кутова швидкість ω обертання якоря необмежено збільшується і в режимі холостого ходу стає в 5–6 разів більше номінального значення. Таке збільшення ω неприпустиме за умов міцності колектора і бандажів, що укріплюють обмотку якоря. По-друге, як відомо, в двигунах послідовного збудження не може бути реалізовано рекуперативне гальмування внаслідок їх електричної нестійкості. Нарешті, в транспортних електроприводах електрорухомого складу (в електровозах, електропоїздах, мотор-вагонах метрополітену, трамваях) м'якість характеристик двигунів являється причиною розносного буксування коліс рухомого складу, для недопущення якого треба мати жорсткі характеристики двигуна.

Тому далі, в цій роботі розв'язати ці задачі пропонується за допомогою застосування суперконденсаторних накопичувачів електроенергії [1, 13, 16, 19].

Мета

Розширення діапазону навантаження та здійснення рекуперативного гальмування (РГ) електричного приводу постійного струму шляхом застосування суперконденсаторних накопичувачів електроенергії.

Методика**Теоретичні передумови перетворення м'яких характеристик в жорсткі**

Як відомо [4, 9] м'якими електромеханічною і механічною характеристиками володіють двигуни послідовного збудження, а жорсткими – двигуни незалежного збудження. Для розв'язання задачі перетворення перших характеристик у другі отримуємо їх аналітичні вирази.

Згідно 2-го закону Кірхгофа маємо (рис. 1):

$$U_m = E_y + R_{дв} I_y, \quad (1)$$

а за законом Фарадея:

$$E_y = c_e \Phi \omega, \quad (2)$$

і згідно закону Ампера:

$$M = c_m \Phi I_y. \quad (3)$$

Тоді, враховуючи вирази (1) – (3), загальні вирази характеристик для обох типів двигунів будуть мати вигляд:

– електромеханічна $\omega(I_y)$:

$$U_m = c_e \Phi \omega + R_{дв} I_y; \\ \omega = \frac{U_m}{c_e \Phi} - \frac{R_{дв}}{c_e \Phi} I_y, \quad (4)$$

– механічна $\omega(M)$:

$$\omega = \frac{U_m}{c_e \Phi} - \frac{R_{дв}}{c_e c_m \Phi^2} M. \quad (5)$$

У виразах (1) – (5) і на рис. 1: U_m – напруга живлення мережі; I_y , I_z – струм якоря та обмотки збудження (ОЗ); $R_{дв} = r_y + r_z$ – сумарний активний опір кола двигуна; c_e , c_m – конструктивні коефіцієнти двигуна; ω – кутова швидкість обертання якоря; Φ – магнітний потік двигуна.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

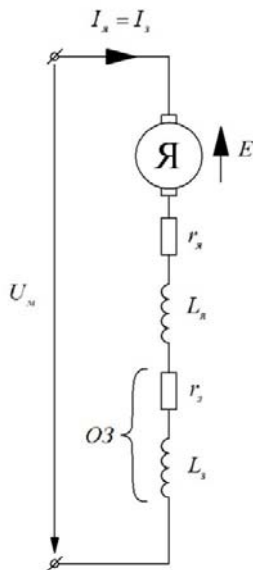


Рис. 1. Принципова схема двигуна постійного струму послідовного збудження

Fig. 1. Schematic circuit of the DC series motor

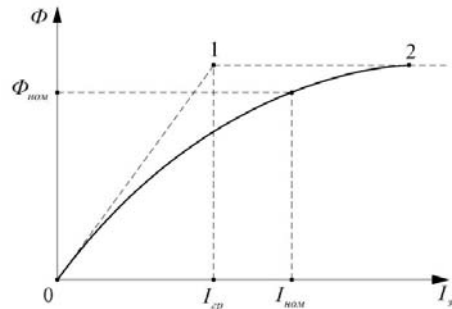
При врахуванні характеристики намагнічування $\Phi(I_3)$ двигуна послідовного збудження рівняння (4) і (5) змінюються. Покажемо це, скориставшись кусково-лінійною апроксимацією кривої $\Phi(I_3)$ (рис. 2). На лінійній ділянці 0–1, коли $I_3 = I_я < I_{ном}$, маємо що $\Phi(I_3) = k_\Phi I_3$ і тоді електромеханічна характеристика прийме вигляд:

$$\omega = \frac{U_m}{c_e k_\Phi I_3} - \frac{R_{дв}}{c_e k_\Phi} = \frac{A}{I_3} - B, \quad (6)$$

де $A = \frac{U_m}{c_e k_\Phi}$, $B = \frac{R_{дв}}{c_e k_\Phi}$, а механічна характеристика буде:

$$\omega = \frac{U_m}{c_e k_\Phi I_3} - \frac{R_{дв}}{c_e c_m k_\Phi^2 I_3^2} M. \quad (7)$$

Із (6) та (7) випливає, що при малих навантаженнях ($I_я < I_{ном}$, рис. 2) характеристики мають рівняння гіперболічного виду (рис. 3), тобто являються м'якими.

Рис. 2. Характеристика залежності магнітного потоку Φ від струму збудження I_3 Fig. 2. Characteristics of dependence of the magnetic flux Φ on the excitation current I_3

На ділянці насичення 1–2 (рис. 2) магнітний потік $\Phi = \text{const}$ і тоді рівняння (4) і (5) перетворюються в лінійно-спадаючі:

$$\omega(I_я) = G - Q I_3, \quad (8)$$

$$\omega(M) = G - F M, \quad (9)$$

де G , Q , F – постійні.

Із порівняння виразів (6) і (8), а також (7) і (9) випливає, що для перетворення м'яких (гіперболічного характеру) характеристик в жорсткі потрібно підтримувати струм збудження I_3 , не «дозволяти» йому зменшуватися. За нашою думкою, це можливо здійснювати розрядом ємнісного накопичувача C_k , увімкненого паралельно обмотці збудження (рис. 4, де r_c – внутрішній опір ємності). При цьому в усталеному режимі (контактор $K1$ замкнено) роботи електропривода, коли $I_я$ і I_3 не змінюються, накопичувач заряджено до напруги на обмотці збудження ($I_я = I_3$, оскільки $I_c = 0$). При зменшенні навантаження ($I_я, M$) частота ω різко збільшується (рис.3) і згідно (2) відповідно зростає проти-е.р.с. якоря E і тому знижується струм I_3 (який дорівнює струмові $I_я$). Напруга на обмотці збудження стає менше напруги U_c на накопичувачі, в результаті останній починає розряджатися через ОЗ й тим самим підтримує I_3 , що й забезпечує збільшення жорсткості характеристик $\omega(I_я)$, $\omega(M)$.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

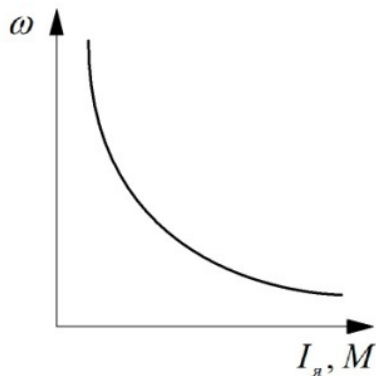


Рис. 3. Механічна і електромеханічна характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження

Fig. 3. Mechanical and electromechanical characteristics of the DC series motor

В схемі рис. 4 можливо другий варіант: в усталеному режимі контактор К1 вимкнено, а К2 – увімкнено і накопичувач C_k заряджається в режимі рекуперації. При потребі К2 вимикається, К1 вмикається й тим самим здійснюється розряд C_k на обмотку збудження.

У подальшому задача полягає у виборі необхідної величини ємності C_k накопичувача, що виконується за таких умов (рис. 4).

Розряд накопичувача здійснюється в перехідному режимі в колі $C_k - r_3 - L_3$, а це означає, що при певних значеннях параметрів елементів кола можливі: аперіодичний, граничний чи періодичний режими розряду. Тому першою умовою є те, що розряд повинен протікати в аперіодичному чи граничному режимі. Тоді ємність вибирається за умови, що сумарний активний опір кола, тобто $(r_c + r_3)$, повинен бути більше критичного опору розрядного кола [6], для рис. 4 рівного $2\sqrt{\frac{L_3}{C_k}}$, звідки шукане значення ємності:

$$C_k \geq 4 \frac{L_3}{(r_3 + r_c)^2}. \quad (10)$$

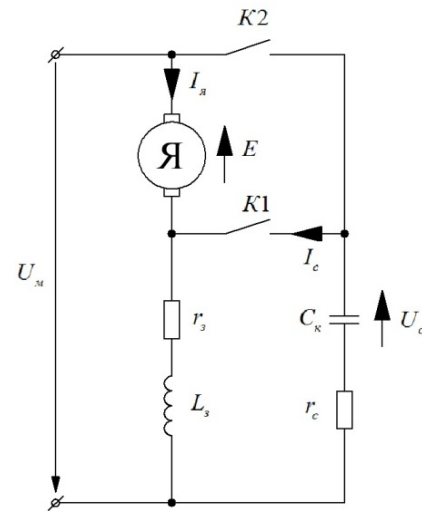


Рис. 4. Принципова схема двигуна постійного струму послідовного збудження з увімкнутим ємнісним накопичувачем

Fig. 4. Schematic circuit of the DC series motor with enabled storage unit

Тривалість перехідного процесу $T_{\text{пр}}$ розряду C_k через ОЗ повинна бути не менше тривалості терміну часу $t_{\text{пр}}^{\text{min}}$ роботи двигуна електроприводу при малому навантаженні:

$$T_{\text{пр}} \geq t_{\text{пр}}^{\text{min}}. \quad (11)$$

З іншого боку, як відомо [6], $T_{\text{пр}} = (4 \dots 5) \tau$, де τ – стала часу розрядного кола; отримаємо її методом вхідного опору [6].

Вхідний комплексний опір розрядного кола (рис.4) запишеться як

$$\underline{Z}(j\omega) = (r_c + r_3) + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_k}, \quad (12)$$

звідки характеристичне рівняння має вигляд

$$(r_c + r_3) + pL_3 + \frac{1}{pC_k} = 0, \quad (13)$$

розв'язання дає корені

$$p_{1,2} = -\frac{r_c + r_3}{2L_3} \pm \sqrt{\left(\frac{r_c + r_3}{2L_3}\right)^2 - \frac{1}{L_3 C_k}}. \quad (14)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Оскільки $\tau = \left| \frac{1}{p} \right|$, а в задачі два кореня, тоді, згідно (11), маємо:

$$t_{\text{пр}}^{\text{max}} = \frac{4 \dots 5}{\left| \frac{r_C + r_3}{2L_3} \pm \sqrt{\left(\frac{r_C + r_3}{2L_3} \right)^2 - \frac{1}{L_3 C_K}} \right|}. \quad (15)$$

Третя умова визначення C_K повинна бути виконана у випадку, коли мережева напруга живлення U_m являє собою випадковий (стохастичний) процес й тим самим можливий режим резонансу на певній частоті. І тому умова полягає в недопущенні в силовому колі рис. 4 режиму резонансу напруг, що можливо, коли, як відомо [9], в колі спостерігається рівність нулю реактивної складової вхідного опору:

$$\text{Im} \left[Z_{\text{вх}}(j\omega) \right] = 0,$$

тобто, для кола рис.4 маємо умову:

$$\text{Im} \left[r_я + j\omega L_я + \frac{(r_3 + j\omega L_3) \left(r_C - j \frac{1}{\omega C_K} \right)}{\left(r_3 + r_C + j\omega L_3 - j \frac{1}{\omega C_K} \right)} \right] = 0. \quad (16)$$

Формули (10), (15), (16) і є виразами вибору величини C_K накопичувача.

Теоретичні передумови імпульсної рекуперації

Рекуперативне гальмування (РГ) можливо застосовувати в підйомно-транспортних установках, приводах карусельних верстатів і в системах електричного транспорту. В двигунах з послідовним збудженням це можливо лише при накопиченні електроенергії не в живлячу електромережу, а в незалежний накопичувач, зокрема, в ємнісний (істотно, при умові відімкнення двигуна від мережі). Розглянемо цей режим на прикладі схеми рис. 5. При цьому вважаємо що ємність C_K було заряджено до великої напруги U_{C0} від обмотки збудження в нерекуперативному режимі при увімкненому контакторі K1 (рис. 4).

При перемиканнях, зв'язаних з переходом від робочого режиму до гальмівного рекуперативного, магнітні системи ТЕД розмагнічуються до залишкової індукції, що складає 2–3% від номінальної. І тому на початку режиму рекуперації в обмотці якоря ТЕД індукується невелика залишкова е.р.с., яка не в змозі створити необхідний за величиною зарядний струм. В зв'язку з цим і відсутністю незалежного збудження ТЕД (рис. 5) перехід ТЕД до режиму повноцінної рекуперації здійснюється не миттєво, а через протікання так званої початкової стадії, під якою розуміється період самозбудження ТЕД з одночасним повільним зростанням е.р.с. і струму якоря, однак ще при відсутності процесу передачі рекуперативної електроенергії в ємнісний накопичувач.

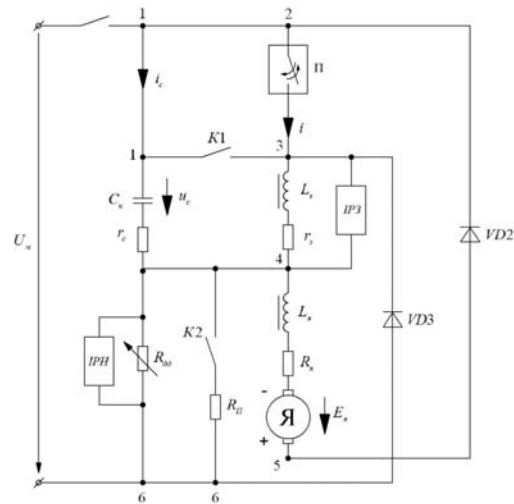


Рис. 5. Схема ввімкнення ємнісного накопичувача і імпульсного перетворювача

Fig. 5. Schematic circuit of the DC series motor with enabled storage unit

Для здійснення процесу самозбудження виконується реверсування обмотки якоря ТЕД і вмикається імпульсний регулятор П (контактори K1 і K2 на рис. 5 вимкнені), тим самим створюється коло самозбудження 2 – 3 – 4 – 5 – VD2 – 2 для протікання струму через обмотку збудження ТЕД. Однак поки що (на початку) зарядний струм по цьому колі не протікає, оскільки, по-перше, ємність C_K накопичувача (внаслідок невеликої залишкової енергії, енергії «мертвого» об'єму [2]) має початкову напругу

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

U_{C0} , яка перевищує сумарну початкову («за-лишкову») е.р.с. $E_{я0}$ якоря двигуна, і, по-друге, катод напівпровідникового діода $VD2$ має потенціал «+», створений ємністю C_k , і тому він закритий. У зв'язку з цим далі застосовується форсування (зменшення терміну часу) процесу самозбудження ТЕД шляхом його підмагнічування від ємності C_k накопичувача. Для цього вмикаються контактор $K2$ та імпульсний регулятор $П$ (рис.5). В результаті створюється коло $1-2-3-4-K2-R_{\Pi}-6-IPH-r_C-C_k-1-r_C-C_k-1$, (при цьому резистор R_{Π} після самозбудження вмикається). Рівняння цього режиму має вигляд:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{L_{\Sigma} C_k} u_C(t) = E_{я}(t), \quad (17)$$

де $R_{\Sigma} = r_C + R_{дд} + r_3 + r_{я}$; $L_{\Sigma} = L_{я} + L_3 + L_{дп}$.

В цій фазі ємність розряджається, а е.р.с. якоря $E_{я}$ збільшується за рахунок протікання розрядного струму по обмотці збудження, тобто внаслідок підмагнічування. Протікання струму по цьому колу, а отже і по ОЗ ТЕД, форсує підмагнічування ТЕД, що обумовлює зростання початкової е.р.с. ($E_{я0}$) ТЕД. Остання стає більшою, ніж U_{C0} ($E_{я0} > U_{C0}$), діод $VD2$ відкривається і по раніше зібраному колу $2-3-4-5-VD2-2$ (колу самозбудження) починає протікати гальмівний струм ТЕД, який зростає по мірі підсилення намагнічування системи ТЕД згідно рівняння:

$$R_{\Sigma} i(t) + L_{\Sigma} \frac{di}{dt} = E_{\Gamma}(t), \quad (18)$$

при початковій умові $i(0) = \frac{E_{\Gamma}}{r_C + R_{дд} + r_3 + r_{я}}$.

Розв'язок рівняння (18) має вигляд $i(t) = \frac{E_{\Gamma}(t)}{r_3 + r_{я}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$. В результаті $E_{я}$ зростає до максимального значення ($E_{я,max}$). Після цього початкову стадію РГ, стадію самозбудження, можна вважати закінченою.

Далі переривач Π (рис. 5) вмикається і попереднє коло $2-3-4-5-VD2-2$ струму гальмування (але ще не зарядного) переривається.

І тепер гальмівний струм під дією е.р.с. $E_{я,max}$ починає протікати уже по новому колу $5-VD2-2-1-C_k-r_C-IPH-6-VD3-3-4-5$. Цей гальмівний рекуперативний струм і заряджає ємність C_k накопичувача.

У подальшому процес заряджання здійснюється в залежності від величини швидкості, наприклад, опускання вантажу електроприводом.

Щоб в зоні від високих до середніх швидкостей е.р.с. якоря ($E_{я} = c_e \Phi V$) не перевищувала допустимої напруги на колекторі ТЕД потрібно, щоб останній працював на лінійній ділянці кривої намагнічування $c_e \Phi(I_3)$ (рис. 2), тому потік Φ треба регулювати. По-друге, при зниженні швидкості підтримку на заданому рівні величини $E_{я,max}$ теж треба здійснювати регулюванням (збільшенням) величини $c_e \Phi$. Останнє в зазначеній вище зоні швидкостей регулювання збудження ТЕД виконується за допомогою імпульсного регулятора збудження ІРЗ струму і тому $E_{я} = \text{const} = E_{я,max}$. Одночасно, підтримка гальмівного зарядного струму здійснюється виводом опору резистора $R_{дд}$ імпульсним регулятором ІРН (рис. 5). Рівняння режиму цього етапу таке:

$$u_C(t) + R_{\Sigma} i(t) + R_{дд}(t) i(t) + L_{\Sigma} \frac{di}{dt} = E_{я,max}, \quad (19)$$

а через $u_C(t)$:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R_{\Sigma} + R_{дд}(t)}{L_{\Sigma}} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{L_{\Sigma} C} u_C(t) = E_{я,max}. \quad (20)$$

В зоні середніх і низьких швидкостей заряджання починається при виході магнітної системи ТЕД на характеристику повного магнітного поля (на ділянці насичення характеристики $c_e \Phi(I_3)$) (рис. 2). Оскільки на цій ділянці $c_e \Phi \approx \text{const}$, імпульсний регулятор ІЗР не діє і тому його вмикають, а гальмівний струм підтримується на рівні уставки регулятором ІРН

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

шляхом подальшого виводу опору резистора $R_{\text{дд}}$. При цьому в початковий термін етапу ємність $C_{\text{к}}$ накопичувача заряджається повним струмом силового кола доти, поки е.р.с. $E_{\text{я}}$, що зменшується, не урівноважить зростаючу напругу накопичувача з урахуванням спаду напруги на R_{Σ} силового кола ТЕД. При такій умові подальше зарядження $C_{\text{к}}$ повним гальмівним струмом силового кола уже не може бути забезпечене. Подальше зарядження повинно здійснюватися шляхом імпульсної передачі енергії через індуктивні елементи силового кола. Для цього необхідно задати імпульсний періодичний режим роботи імпульсного регулятора П, починаючи з мінімального значення коефіцієнта заповнення його імпульсного циклу. Переривач (імпульсний регулятор) П короткочасно вмикається й тим самим закорочує силове коло ТЕД по колу 2 – 3 – 4 – 5 – VD2 – 2. За цей термін часу при протіканні зростаючого гальмівного струму в індуктивностях силового кола ТЕД накопичується енергія. Через деякий час регулятор П вимикається і гальмівний зарядний струм протікає під дією $E_{\text{я,max}}$ і накопиченої в індуктивностях електроенергії по колу (рис.5): 3–4–5–VD2 – 2 – 1 – $C_{\text{к}}$ – $r_{\text{с}}$ – IPH – 6 – VD3 – 3. Напруга на ємності $C_{\text{к}}$ зростає, а гальмівний струм $i(t)$ зменшується до певного значення. При наступному вмиканні регулятора П (рис. 5) ТЕД знову переходить в режим к.з., знову $i(t)$ збільшується, а при вимиканні П – зменшується і далі процес повторюється. В квазіусталеному режимі роботи схеми рис. 5 перемикання регулятора П мають стабільний коливальний характер з частотою від 30 до 600 Гц. Однак при цьому треба враховувати, що в процесі гальмування швидкість обертання якоря ТЕД зменшується, в результаті знижується генераторна е.р.с. двигуна. Тому для підтримання заданих меж струму, що необхідно для підтримання гальмівного струму ($I_{\text{я}} = \text{const}$), потрібно: а) в термін замкненого стану регулятора П зменшувати коефіцієнт імпульсного заповнення $\gamma = \frac{t_i}{T}$; б) в термін вимкнутого стану

П зменшувати імпульсним регулятором IPH величину додаткового опору $R_{\text{дд}}$.

Вибір типу конденсаторного накопичувача

Ідея використання накопичувачів електроенергії в різних системах і пристроях не є новою і не заперечується. Стосовно електричного приводу, то найбільш докладні дослідження виконано для систем електричного транспорту, особливо для міського транспорту (трамваїв і тролейбусів) [2, 3, 5, 7, 8, 10-12, 14, 15, 17, 21]. Для систем загальнопромислового електроприводу публікації результатів досліджень авторам невідомі. В існуючих роботах розглядаються застосування установок, головним чином, на основі індуктивних, електрохімічних, напівпровідникових індуктивних та ємнісних накопичувачів. При цьому більшість дослідників, у тому числі і закордонних, робить висновок, що найбільш доцільно застосування ємнісних накопичувачів і обов'язково на базі суперконденсаторів (або інакше: ультраконденсаторів, конденсаторів надвисокої енергоємності, конденсаторів подвійного електричного шару (КПЕШ) та інші).

Це обумовлено тим, що суперконденсаторні накопичувачі володіють високою питомою потужністю, порядку $10^4 - 10^6$ кВт/кг, при накопичуваній питомій електроенергії 45 – 50 кДж/кг і терміну часу заряду до 30 с, високий (88 – 90%) к.к.д., характеризуються малим внутрішнім опором, що дозволяє досягати питомої потужності імпульсного розряду до 100 Вт/см^3 . Модулі КПЕШ витримують напругу в сотні вольт і величину струму в декілька кілоампер. Суперконденсатори не мають негативної екологічної дії і вибухобезпечні.

Дослідженнями та розробками в сфері суперконденсаторів займаються більше 50 компаній в різних країнах, з них більша частина компаній займається розробкою і виготовленням малогабаритних КПЕШ, призначених для використання в малопотужних електричних схемах для портативних та побутових електронних пристроїв [1, 18-20].

Найбільш високі характеристики серед КПЕШ в сотні тисяч фарад на елемент доступні

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

компаніям Maxwell (США), Matsuchita Electric Industrial (Японія), SAFT (Франція), EPCOS (Германія, підготовка виробництва за ліцензією Maxwell), YUNASKO (Україна), NessCap (Южна Корея), випускають КПЕШ з органічним електролітом і російські компанії ЭСМА, ЭКОНД, ЭЛТОН, ELIT, у яких КПЕШ має водний склад електроліту.

Результати та аналізи чисельних розрахунків

Розглянемо вибір блоку суперконденсаторів і процес його дії при різкому зменшенні навантаження (чи в режимі буксування колісної пари, чи при різкій зміні напруги) тягового двигуна типу ЕД141У1 електровоза ДЕ1, що має параметри: $I_{\text{ном}} = 565 \text{ А}$, $r_3 = 0,019 \text{ Ом}$, $L_3 = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

Згідно умови (10), необхідна ємність блоку суперконденсаторів для одного двигуна буде: $C_k = 54,3 \text{ Ф}$.

Виходячи із значень ємності, маси і об'єму найбільш поширених типів суперконденсаторів, а також віддаючи перевагу вітчизняному виробнику, використаємо суперконденсатори типу E-cells (виробник YUNASKO, Україна), які мають такі технічні характеристики:

- електрична ємність – $C_{\text{ск}} = 480 \text{ Ф}$;
- номінальна напруга – $U_{\text{ск}} = 2,7 \text{ В}$;
- максимальний струм розряду:
 - при $\Delta T = 15^\circ\text{C} - 165 \text{ А}$;
 - при $\Delta T = 40^\circ\text{C} - 270 \text{ А}$;
- максимальний струм к.з. – 2700 А ;
- довжина – $h = 214 \text{ мм}$;
- ширина – $l = 131 \text{ мм}$;
- товщина – $d = 17 \text{ мм}$;
- маса (вага) – $M = 0,07 \text{ кг}$;
- об'єм – $V_{\text{ск}} = 0,00013 \text{ м}^3$;
- максимальний внутрішній опір – $0,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$;
- робоча температура – $T = -40^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$;
- постійна часу – $\tau = 0,6 \pm 0,1 \text{ с}$;
- кількість циклів «заряду-розряду» – $> 10^5$.

В номінальному режимі роботи двигуна напруга на обмотці збудження складає:

$$U_3 = r_3 I_{\text{ном}} = 0,019 \cdot 565 = 10,74 \text{ В}.$$

Тоді для забезпечення необхідної максимальної напруги блок конденсаторів повинен мати таку кількість послідовно з'єднаних елементів – суперконденсаторів:

$$n = \frac{10,74}{2,7} = 4 \text{ шт.}$$

А, враховуючи допустиме значення струму, отримаємо кількість паралельно увімкнених суперконденсаторів:

$$m = \frac{565}{270} = 2 \text{ шт.}$$

Тоді розрахункова ємність блока накопичувача складе:

$$C_n = \frac{C_{\text{ск}}}{n} m = \frac{480}{4} \cdot 2 = 240 \text{ Ф}.$$

а внутрішній опір:

$$r_C = \frac{R_{\text{ск}}}{m} n = \frac{0,00017}{2} \cdot 4 = 0,00034 \text{ Ом}.$$

і загальний об'єм:

$$V_C = 13 \cdot 10^{-5} \cdot 8 = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Оскільки $r_C \ll r_3$, то r_C у подальших розрахунках нехтуємо.

Розрахуємо перехідну напругу $u_C(t)$ на блоці суперконденсаторів і струм розрядження згідно рис. 4.

Згідно схеми рис. 4 з параметрами $C_k = 54,3 \text{ Ф}$, $r_3 = 0,019 \text{ Ом}$ і $L_3 = 0,0049 \text{ Гн}$ і за виразом (14), корені характеристичного рівняння дорівнюють: $p_1 = p_2 = p = -1,94 \text{ с}^{-1}$, згідно якого шукана перехідна $u_C(t)$ може бути записана у вигляді [6]:

$$u_C(t) = (A_1 + A_2 t) e^{p \cdot t}. \quad (21)$$

Визначимо постійні інтегрування A_1 і A_2 , для чого візьмемо похідну від (21):

$$u_C'(t) = A_2 e^{p \cdot t} + (A_1 + A_2 t) p e^{p \cdot t}. \quad (22)$$

Запишемо (21) і (22) для моменту комутації $t = 0$:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$\begin{cases} u_C(0) = A_1, & (23) \\ u_C'(0) = A_2 + A_1 p. & (24) \end{cases}$$

До комутації суперконденсаторний накопичувач був заряджений до U_3 , тобто, $u_C(0) = U_0 \neq 0$, а через обмотку збудження протікав струм навантаження, тобто, $i_C(0) = i_3(0) = I_0$.

Як відомо, струм в ємності: $i_C(t) = C \frac{du_C}{dt}$,

тобто, $u_C'(0) = \frac{i_C(0)}{C_k} = \frac{I_0}{C_k}$.

Тоді система рівнянь (23) – (24) прийме вигляд:

$$\begin{cases} U_0 = A_1, & (25) \\ \frac{I_0}{C_k} = A_2 + A_1 p. & (26) \end{cases}$$

Визначивши із (25) і (26) постійні A_1 та A_2 і підставивши їх в (21), отримаємо:

$$u_C(t) = \left[U_0 + \left(\frac{I_0}{C_k} - U_0 p \right) t \right] e^{pt}, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} i_C(t) = i_3(t) = C_k \frac{du_C}{dt} = \\ = \left[I_0 (1 + pt) - \frac{U_0}{L} t \right] e^{pt}. \end{aligned} \quad (28)$$

За виразом (28) було виконано чисельні розрахунки перехідного розрядного струму, що протікає через обмотку збудження при різних ступенях навантаження ($I_0 = 0; 56,5; 113$ А) і $U_0 = U_3 = 10,74$ В; результати представлено на рис.6. Із цього рисунка випливає, що при спаді навантаження до 0% (крива 1), 10% (крива 2) і 20% (крива 3) від $I_{ном} = 565$ А струм збудження підтримується на достатньому рівні на протязі 2 секунд. Якщо за виробничими умовами цього недостатньо, тоді можливо передбачити другу ступінь розряду з аналогічним суперконденсаторним накопичувачем.

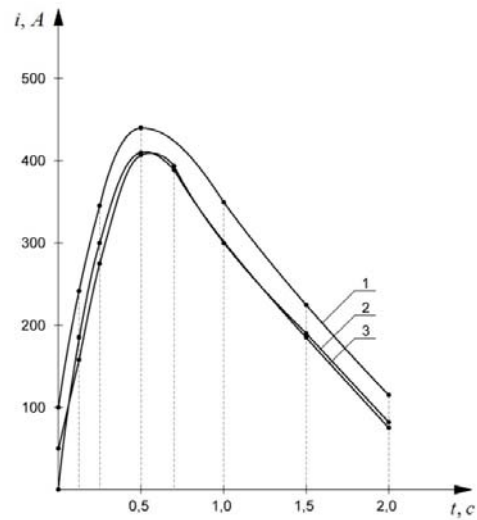


Рис.6. Результати чисельних розрахунків перехідного розрядного струму, що протікає через обмотку збудження при різних ступенях навантаження у графічному вигляді

Fig. 6. Results of the numerous calculations of the transient discharge current flowing through the excitation winding at different load levels in a graphical form

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено теоретичні підходи щодо перетворення м'яких механічної та електромеханічної характеристик в жорсткі електродвигунів постійного струму послідовного збудження. Вперше запропоновано і обґрунтовано новий, комбінований, метод РГ двигунів послідовного збудження. Подальший розвиток отримали методи оцінки параметрів блока ємнісного накопичувача з урахуванням критеріїв надійної паралельної роботи суперконденсаторів з обмоткою збудження електродвигуна.

Запропоноване і обґрунтоване перетворення м'яких характеристик в жорсткі дозволяє використовувати загальнопромислові електроприводи з двигунами послідовного збудження і при малих навантаженнях, а в тягових електроприводах – знизити інтенсивність буксування колісних пар електрорухомого складу. Розроблена методика розв'язування рівнянь перехідних дає можливість врахувати випадковий характер зміни напруги на двигуні в режимах зарядження і розрядження суперконденсаторного накопичувача. Запропонований комбінований метод РГ робить можливим здійснювати РГ

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

і при малих швидкостях обертання якоря електродвигуна й тим самим дозволяє підвищити енергоефективність експлуатації електроприводів цього типу.

Висновки

1. М'якість механічної та електромеханічної характеристик двигунів постійного струму послідовного збудження обумовлює ряд недоліків їх роботи в електроприводі.

2. Перетворення м'яких характеристик двигуна в жорсткі можливо шляхом розрядження при малих навантаженнях ємнісного накопичувача електроенергії через обмотку збудження двигуна.

3. Розрахунок необхідної величини ємності накопичувача повинен здійснюватися за трьох умов, головною із яких є та, щоб при цьому спостерігався аперіодичний чи граничний режим розрядження.

4. Використання ємнісного накопичувача робить можливим здійснювати рекуперативне гальмування двигуна послідовного збудження з застосуванням режиму імпульсної передачі енергії при малих швидкостях обертів якоря двигуна.

5. В якості ємнісного накопичувача доцільно використовувати суперконденсаторний накопичувач, оскільки він володіє високою питомою потужністю, великим терміном часу збереження енергії, розрахований на велику кількість зарядно-розрядних циклів, має високий к.к.д., характеризується малим внутрішнім опором, його модулі витримують напругу в сотні вольт і величину струму в декілька кілоампер.

6. Виходячи із значень ємності, маси та об'єму доцільно використовувати суперконденсатори типу E-cells (виробник YUNASKO, Україна) або типу VCAP (виробник Maxwell, США).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Астахов, А. Конденсаторы с двойным электрическим слоем / А. Астахов, С. Карабанов, Ю. Кухмистров // Радио. – 1997. – № 4. – С. 57–58.
2. Васильев, В. А. Анализ возможности применения емкостных накопителей энергии на электрическом подвижном составе / В. А. Васильев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщ. – 2011. – Вып. 1. – С. 35–44.
3. Евстафьев, А. М. Применение емкостных накопителей на электрическом подвижном составе / А. Е. Евстафьев // Eltrans'2009 : материалы междунар. симп. – Санкт-Петербург. – 2009. – С. 537–545.
4. Колб, А. А. Теорія електроприводу / А. А. Колб. – Днепропетровск : НГУ, 2006. – 511 с.
5. Костін, М. О. Використання суперконденсаторних накопичувачів енергії рекуперативного гальмування на локомотивах постійного струму ВЛ11М6 / М. О. Костін, А. М. Муха, А. В. Нікітенко // Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2015» : тези ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. (21.12–22.12.2015). – Дніпропетровськ, 2015. – С. 102–103.
6. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки : у 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2007. – Т. 2. – 273 с.
7. Рябцев, Г. Г. Расчет конденсаторных накопителей энергии для вагонов метрополитена / Г. Г. Рябцев, И. А. Ермаков, Н. А. Рубичев // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 15–19.
8. Спиридонов, Е. А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Спиридонов Егор Александрович ; Новосиб. гос. тех. ун-т. – Новосибирск, 2010. – 165 с.
9. Теорія електропривода / М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилук [та ін.] ; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 494 с.
10. Штанг, А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Штанг Александр Александрович ; Новосиб. гос. тех. ун-т. – Новосибирск, 2006. – 233 с.
11. Щуров, Н. И. Определение параметров накопительного устройства для электротранспортного комплекса / Н. И. Щуров, А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов // Электричество. – 2007. – № 6. – С. 53–56.
12. Harpool, S. Supercapacitor Performance Characterization for Renewables Applications / S. Harpool, A. von Jouanee, A. Yokochi // IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech) (24.07–26.07.2014). – Portland, OR, USA, 2014. – P. 160–164. doi: 10.1109/SusTech.2014.7046237.
13. Iannuzzi, D. Speed-Based State-of-Change Tracking Control for Metro Trains with Onboard Supercapacitors / D. Iannuzzi, P. Tricoli // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27. – Iss. 4. – P. 2128–2140. doi: 10.1109/tpel.2011.2167633.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

14. Improvement of light load efficiency of dual active bridge DC-DC converter by using dual leakage transformer and variable frequency / G. Guidi, M. Pavlovsky, A. Kawamura, T. Imakubo, Y. Sasaki // Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition : Conf. Paper (12.09–16.09.2010). – Atlanta, GA, USA, 2010. – P. 830–837. doi: 10.1109/ecce.2010.5617909.
15. Klohr, M. Energiespeicher auf Straßen-und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojekt / M. Klohr, A. Maroschik // Elektrische Bahnen. – 2012. – Vol. 110, no. 8/9. – P. 444–451.
16. Tango fur Genf mit // Elektrischen Bahnen. – 2012. – Vol. 110, No. 8/9. – P. 508.
17. Optimal Energy Storage Sizing and Control for Wind power Applications / Ted K. A. Brekken, A. Yokochi, A. von Jouanne, Z. Z. Yen, H. Max Hapke, D. A. Halamay // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2011. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 69–77. doi: 10.1109/TSTE.2010.2066294.
18. Pulling, N. Tram builders go to ground to find business / N. Pulling // Tramways&Urban Transit. – 2009. – No. 72 (860). – P. 300–303.
19. Rufer, A. Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substations in DC-Transportation Networks / A. Rufer, P. Barrade, D. Hotellier // EPE Journal. – 2004. – Vol. 14. – Iss. 4. – P. 43–49. doi: 10.1080/09398368.2004.11463573.
20. Transit new // Railway Journal. – 2009. – No. 6. – P. 10–12.
21. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb // Elektrische Bahnen. – 2010. – Vol. 108, no. 1/2. – P. 93–94.

А. Н. МУХА^{1*}, Н. А. КОСТИН², Е. Я. КУРИЛЕНКО³, Г. В. ЦИПЛЯ⁴

^{1*}Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, эл. почта andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

²Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, эл. почта nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

³Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, эл. почта kyrienko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

^{4*}Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 043 06 29, эл. почта glebtsyplia@gmail.com, ORCID 0000-0002-5568-605X

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Цель. В научной работе необходимо проанализировать расширение диапазона нагрузки и осуществления рекуперативного торможения (РТ) электрического привода постоянного тока путем применения суперконденсаторных накопителей электроэнергии. **Методика.** Для решения поставленной задачи используются методы теории электропривода, импульсной электротехники и методика расчета переходных электромагнитных процессов в линейных электрических цепях при наличии в них суперконденсаторов. **Результаты.** Осуществлено существенное увеличение жесткости механической и электромеханической характеристик двигателей последовательного возбуждения, что дает возможность использования электропривода постоянного тока при нагрузке, значительно меньшей, чем 15–20 % от номинальной. Выполнены численные расчеты процесса действия суперконденсаторного накопителя электроэнергии при резком уменьшении нагрузки тягового электродвигателя электровоза постоянного тока. Обоснована возможность РТ электропривода постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения. Выполнено решение уравнений процесса зарядки и разрядки суперконденсаторного накопителя в режиме РТ. Исследовано влияние величины емкости на характер поддержания во времени тока возбуждения электродвигателя в режиме малых нагрузок. **Научная новизна.** Разработаны теоретические подходы по преобразованию мягких (механических и электромеханических) характеристик в жесткие электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Впервые предложен и обоснован новый, комбинированный метод РТ двигателей последовательного возбуждения. Дальнейшее развитие получили методы оценки параметров блока емкостного нако-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

пителя с учетом критериев надежной параллельной работы суперконденсаторов с обмоткой возбуждения электродвигателя. **Практическая значимость.** Предложенное и обоснованное авторами преобразование мягких характеристик в жесткие позволяет использовать общепромышленные электроприводы с двигателями последовательного возбуждения и при малых нагрузках, а в тяговых электроприводах – снизить интенсивность буксования колесных пар электроподвижного состава. Разработанная методика решения переходных уравнений дает возможность учесть случайный характер изменения напряжения на двигателе в режимах зарядки и разрядки суперконденсаторного накопителя. Предложенный комбинированный метод делает возможным осуществление РТ и при малых скоростях вращения якоря электродвигателя, тем самым повышая энергоэффективность эксплуатации электроприводов этого типа.

Ключевые слова: электропривод; накопитель; рекуперация; суперконденсатор; характеристика электродвигателя; ток; процесс; электроэнергия

A. M. MUKHA^{1*}, M. O. KOSTIN², O. Y. KURYLENKO³, H. V. TSYPLIA⁴

^{1*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{2*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

^{3*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail kyrilenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

^{4*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 043 06 29, e-mail glebtsyplia@gmail.com, ORCID 0000-0002-5568-605X

ENHANCING THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF DIRECT CURRENT DRIVE BASED ON USE OF SUPERCONDENSER POWER STORAGE UNITS

Purpose. The scientific work is intended to analyse the expansion of the load range and the implementation of regeneration braking (RB) of the direct current drive by using the supercondenser power storage units. **Methodology.** To solve the problem, we use the methods of the electric drive theory, impulse electronics and the method of calculation of transient electromagnetic processes in linear electric circuits in the presence of supercondensers therein. **Findings.** The stiffness of the mechanical and electromechanical characteristics of a series motor is significantly increased, which makes it possible to use a DC drive under load, much smaller than 15...20% of the nominal one. Numerical calculations of the operation process of the supercondenser power storage unit were fulfilled with a sharp decrease in the load of a traction electric motor of a direct current electric locomotive. The possibility of RB of the direct current drive with the series motor is substantiated. The equations of the process of charging and discharging of super-condenser storage unit in RB mode are solved. The authors examined the effect of capacitance on the nature of maintaining the excitation current of an electric motor in the mode of small loads. **Originality.** The paper developed theoretical approaches for the transformation of soft (mechanical and electromechanical) characteristics into hard ones of DC series motors. For the first time a new, combined method of the series motor RB is proposed and substantiated. Further development obtained the methods for evaluating the storage unit parameters, taking into account the criteria for reliable parallel operation of super-condensers with an electric motor field. **Practical value.** The proposed and substantiated transformation of soft characteristics into stiff ones allows us to use general-purpose electric drives with series motors and at low loads, and in traction electric drives - to reduce the intensity of electric stock wheel slipping. The developed method of solving transitional equations makes it possible to take into account the random nature of the voltage change on the motor in super-condenser drive charge and discharge modes. The proposed combined method makes it possible to carry out RB at low speeds of the motor armature as well, and thus to increase energy efficiency of operation of electric drives of this type.

Key words: electric drive; storage unit; regeneration; super-condenser; characteristic of the electric motor; current; process; power

REFERENCES

1. Astakhov, A., Karabanov, S., & Kukhmistrov, Y. (1997). Kondensatory s dvoynym elektricheskim sloyem. *Radio*, 4, 57-58.
2. Vasilyev, V. A. (2011). The Analysis of Application Possibility of the Capacitor Energy Storing Devices on the Electric Rolling Stock. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 1 (26), 35-44.
3. Yevstafev, A. M. (2010). Primeneniye emkostnykh nakopiteley na elektricheskom podvizhnom sostave. In *Proceedings of the 5th International symposium «ELTRANS-2009», October 20-23, 2009, SPb* (pp. 537-545). St. Petersburg: PGUPS.
4. Kolb, A. A. (2006). *Teoriia elektropriyvodu*. Dnipropetrovsk: National Mining University.
5. Kostin, M. O., Mukha, A. M., & Nikitenko, A. V. (2015). Vykorystannia superkondensatornykh nakopychuvachiv enerhii rekuperatyvnoho halmuvannia na lokomotyvakh postiihnoho strumu VL11M6. In *Proceedings of the VIII International Scientific Conference Electrification on Transport «TRANSELECTRO-2015», December 21-22, 2015, Dnipropetrovsk* (pp. 102-103). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
6. Kostin, M. O., & Sheikina, O. H. (2007). *Teoretychni osnovy elektrotekhniki* (Vol. 2). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
7. Ryabtsyev, G. G., Yermakov, I. A., & Rubichyev, N. A. (2011). Raschet kondensatornykh nakopiteley energii dlya vagonov metropolitena. *Russian Electrical Engineering*, 8, 15-19.
8. Spiridonov, Y. A. (2010). *Povysheniye effektivnosti ispolzovaniya energii v elektrotransportnykh kompleksakh s nakopitelnyimi ustroystvami*. (PhD thesis). Available from Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk.
9. Popovych, M. H. (Ed). (1993). *Teoriia elektropriyvoda* [textbook]. Kyiv: Vyshcha shkola.
10. Shtang, A. A. (2006). *Povysheniye effektivnosti elektrotransportnykh sistem na osnove ispolzovaniya nakopiteley energii*. (PhD thesis). Available from Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk.
11. Shchurov, N. I., Shtang, A. A., Spiridonov, E. A., Prokushev, Y. A., & Vertokhvostov, A. P. (2007). Determination of the Parameters of an Energy Store for an Electric Transport System. *Electrical Technology Russia*, 6, 53-56.
12. Harpool, S., von Jouanee A., & Yokochi A. (2014). Supercapacitor Performance Characterization for Renewables Applications. In *Proceeding of the IEEE Conference on Technologies for Sustainability SusTech, July 24-26, 2014, Portland, OR, USA*. 160-164. doi:10.1109/SusTech.2014.7046237
13. Iannuzzi, D., & Tricoli P. (2012). Speed-Based State-of-Change Tracking Control for Metro Trains with Onboard Supercapacitors. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 27 (4), 2128-2140. doi:10.1109/tpel.2011.2167633.
14. Guidi, G., Pavlovsky, M., Kawamura, A., Imakubo, T., & Sasaki, Y. (2010). Improvement of light load efficiency of dual active bridge DC-DC converter by using dual leakage transformer and variable frequency. In *Proceeding of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 12-16, 2010, Atlanta, GA, USA*. 830-837. doi:10.1109/ecce.2010.5617909
15. Klohr, M., & Maroschik, A. (2012). Energiespeicher auf Straßen-und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojekt. *Elektrische Bahnen*, 110 (8-9), 444-451.
16. Tango fur Genf mit. (2012). *Elektrischen Bahnen*, 110 (8-9), 508.
17. Brekken, T. K. A., Yokochi, A., von Jouanne, A., Yen, Z. Z., Napke, H. M., & Halamay, D. A. (2011). Optimal Energy Storage Sizing and Control for Wind power Applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2 (1), 69-77. doi:10.1109/TSTE.2010.2066294
18. Pulling, N. (2009). Tram builders go to ground to find business. *Tramways&Urban Transit*, 72 (860), 300-303.
19. Rufer, A., Barrade, P., Hotellier, D. (2004). Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substations in DC-Transportation Networks. *EPE Journal*, 14 (4), 43-49. doi:10.1080/09398368.2004.11463573
20. Transit new. (2009). *Railway Journal*, 6, 10-12.
21. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb. (2010). *Elektrische Bahnen*, 108 (1/2), 93-94.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. П. Є. Михаліченком (Україна); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)

Надійшла до редколегії: 06.04.2017

Прийнята до друку: 12.07.2017