

УДК 621.314.12.

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ В РЕЖИМІ ГАЛЬМУВАННЯ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПІДКЛЮЧЕННЯМ ЯКОРЯ ДО КОНДЕНСАТОРНОГО НАКОПИЧУВАЧА**О. В. Бялобржеський**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: seemAl@kdu.edu.ua

Проведено аналіз процесів перетворення енергії в колі якоря двигуна постійного струму, що підключений до конденсаторного накопичувача. На підставі аналізу перехідних процесів у колі отримано графічні залежності для розподілу енергії при варіюванні ємністю накопичувального конденсатора. Обґрунтовано доцільність припинення процесу в момент першого сполучення струму з нулем, на підставі чого уточнено залежності розподілу енергії в елементах. У результаті аналізу часової залежності зміни струму сформульовано вимоги по обмеженню струму й визначено напрями їх реалізації.

Ключові слова: машина постійного струму, конденсаторний накопичувач, енергія гальмування, обмеження струму.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОДКЛЮЧЕНИЕМ ЯКОРЯ К КОНДЕНСАТОРНОМУ НАКОПИТЕЛЮ**А. В. Бялобржеский**Кременчугский национальный университет имени Михайла Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: seemAl@kdu.edu.ua

Проведен анализ процессов преобразования энергии в цепи якоря двигателя постоянного тока, подключаемого к конденсаторному накопителю. На основании анализа переходных процессов в цепи получены графические зависимости для распределения энергии при варьировании емкостью накопительного конденсатора. Обоснована целесообразность прекращения процесса в точке первого сопряжения тока с нулем, на основании чего уточнены зависимости распределения энергии в элементах. В результате анализа временной зависимости изменения тока сформулированы требования по ограничению тока и определены направления их реализации.

Ключевые слова: машина постоянного тока, конденсаторный накопитель, энергия торможения, ограничение тока.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Режим роботи електричних машин, систем електропривода, систем електропостачання у значній мірі визначаються як статичними характеристиками технологічних механізмів, так і їх динамічними режимами [1].

В електромеханічних системах зі складними динамічними режимами (екскаваторний електропривод) гальмування механізму в багатьох випадках здійснюється з рекуперацією енергії в мережу [1], для цього досить застосування джерела живлення, що забезпечує двосторонній обмін енергією між машиною й мережею. Але, поряд із зазначеною перевагою, виникає недолік, пов'язаний зі споживанням (розгін) або генерацією (гальмування) досить великої потужності. У результаті коливань струму в енергопостачальній мережі відбувається зміна показників якості електричної енергії [2].

Транспортні засоби з електромеханічною трансмісією, що живляться від контактної мережі, теж мають змінний характер навантаження з частими режимами пуску–гальмування: тролейбуси, метро, трамваї, електровози та ін. За умов пуску транспортного засобу з мережі споживається потужність, яка у кілька разів перевищує номінальну (двигунний режим електричної машини), при гальмуванні механічна енергія перетворюється в електричну (генераторний режим електричної машини) і, зазвичай, передається на гальмові опори, перетворюється в теплову енергію та передається у вигляді тепла у навколишнє середовище. Альтернативні режими гальмування з рекуперацією енергії в мережу зустрічаються дуже рідко та в разі наявності викликають

суттєві перенапруги в мережі, особливо в контактних мережах постійного струму [2].

Метою роботи є аналіз процесів розподілу енергії у системі якірне коло машини постійного струму–конденсаторний накопичувач у режимі гальмування машини.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Відомі пристрої (реверсивні широтно-імпульсні перетворювачі, перетворювачі частоти), в яких, за умов неможливості рекуперації енергії до джерела, використовують ємнісний накопичувач (конденсатор), а за умови підвищення напруги на ньому надлишок енергії переводять на додатковий опір [1].

Останнім часом з'являються розробки, пов'язані із застосуванням накопичувальних конденсаторних елементів (іоністори, суперконденсатори) [3] в електромеханічних системах транспортних засобів. Об'єктами впровадження конденсаторних накопичувачів стають не тільки електротранспортні засоби (тролейбуси, трамваї, метро), але й транспортні засоби з приводом від двигуна внутрішнього згоряння (гібридні системи). Для реалізації динамічних режимів трансмісія додатково оснащується системою електропривода з ємнісними накопичувачами енергії.

Розглянемо елемент схемного рішення системи з конденсаторним накопичувачем, запропонованого в [4], схему якого зображено на рис. 1. Схема містить машину постійного струму (М), випрямляч (В) для живлення обмотки збудження (ОЗ), накопичувально-компенсуючий конденсатор C_s , перетворюючий пристрій (ПП) для керування потоком енергії, яка передається до якоря (Я) машини, і систему керування (СК).

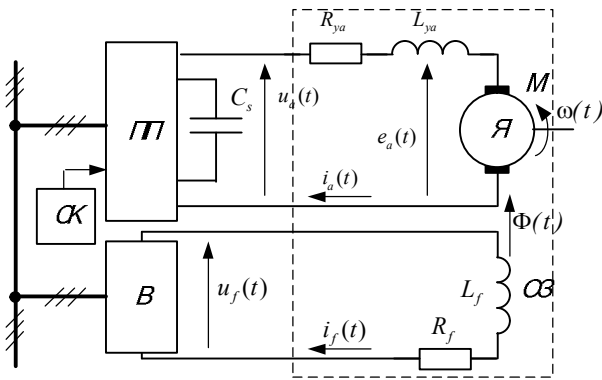


Рисунок 1 – Функціональна схема системи двигун постійного струму–конденсаторний накопичувач

Статичні та динамічні режими двигуна постійного струму та його характеристики в системах з перетворюючими пристроями докладно вивчені науковцями [1, 5]. У [2] запропоновано розрахунки ємнісних елементів як фільтруючих пристроїв. У той же час реалізація гальмівних режимів належним чином не розкрита. Процес гальмування двигуна на конденсаторний накопичувач, відповідно до [4], розглянемо на підставі електричної схеми заміщення, зображеної на рис. 2, за умов постійного потоку збудження $k\Phi = const$. На схемі R_a і L_a – активний опір і індуктивність якоря машини; C_s – накопичувальна ємність, що компенсує; C_a – еквівалентна динамічна ємність обертового якоря, що визначається відповідно до виразу $C_a = \frac{J_\Sigma}{k\Phi^2}$ [5], де J_Σ – сумарний момент інерції якоря двигуна й обертових мас на його валу; $R_l = \frac{\omega \cdot k\Phi^2}{M_l}$ – опір навантаження [5], де M_l – момент опору на валу двигуна.

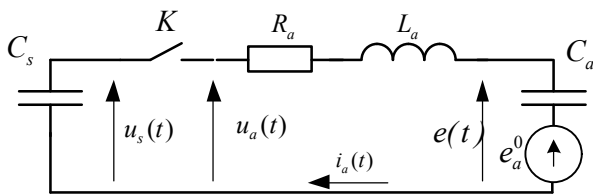


Рисунок 2 – Схема заміщення якорного кола машини постійного струму з накопичувальним конденсатором

Припустимо, що момент опору на валу двигуна дорівнює нулю ($R_l = \infty$); на початку гальмування якор обертається з номінальною швидкістю, при цьому діє проти-е.р.с. $e_a^0 = E_n = \omega_n k\Phi$; струм якоря не має обмежень; напруга на накопичувальному конденсаторі відсутня ($U_{Ns} = 0$). Для спрощення аналізу замінимо у схемі заміщення (рис. 2) дві послідовно з'єднані ємності однією еквівалентною, дотримуючи умови:

$$C_{eq} = \frac{C_s C_a}{C_s + C_a}$$

З урахуванням напруги на еквівалентній ємності:

$$u_{Ceq}(t) = u_{Cs}(t) + u_{Ca}(t) = e_a(t)$$

Таким чином, схема заміщення перетвориться у вигляд, який надано на рис. 3.

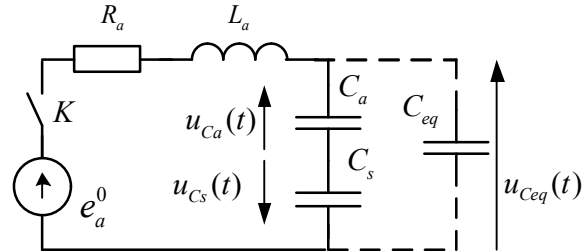


Рисунок 3 – Розрахункова схема заміщення

Розрахунок схеми, за вказаних умов, виконується в два етапи: по-перше, розраховується струм у колі при перезаряді ємності; по-друге, визначається залишкова напруга на конденсаторах.

Для визначення залежності струму від часу необхідно вирішити диференціальне рівняння для схеми (рис. 3) з урахуванням початкових і кінцевих умов [6]:

$$\frac{1}{C_{eq}} \int i_a(t) dt + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + i_a(t) R_a = u_{Ceq}^0 \quad (1)$$

У розглянутому випадку перехідний процес завершиться розрядом еквівалентної ємності C_{eq} (перезарядження ємностей C_s і C_a) і зниженням струму кола до нуля.

У загальному випадку рішення диференціального рівняння (1) буде мати вигляд:

$$i_a(t) = \frac{u_{Ceq}^0}{L_a(p_1 + p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (2)$$

$$\text{де } p_{1,2} = -\frac{R_a}{2L_a} \pm \sqrt{\frac{R_a^2}{4L_a^2} - \frac{1}{\tilde{N}_{eq} L_a}}$$

Отриманий результат відображає закон зміни струму в колі. При цьому невідомим залишається розподіл напруги на конденсаторах. Визначити зазначені величини можна з урахуванням енергії, розсіяної на активному опорі контуру в ході перехідного процесу.

Рівняння енергетичного балансу кола до початку перехідного процесу:

$$W_\Sigma^0 = W_{Ca}^0 + W_{Ra}^0 + W_{La}^0 + W_{Cs}^0, \quad (3)$$

причому через відсутність струму в колі й заряду на накопичувачі $W_{Ra}^0 = 0$; $W_{La}^0 = 0$; $W_{Cs}^0 = 0$.

Сумарний запас енергії до перехідного процесу:

$$W_\Sigma^0 = W_{Ca}^0 = \frac{u_{Ca}^2 C_a}{2} = \frac{e_a^{02} C_a}{2} = \frac{J_\Sigma \omega_n^2}{2} \quad (4)$$

При замиканні ключа й перезаряді ємностей енергія під час перехідного процесу перерозподіляється між елементами схеми (рис. 3) відповідно до (3):

$$W_\Sigma^0 = W_\Sigma^\infty = W_{Ca}^\infty + W_{Ra}^\infty + W_{La}^\infty + W_{Cs}^\infty,$$

а за умов завершення процесу перезаряду ($i_a(t)|_{t \rightarrow \infty} = 0$) вона розподілиться між ємнісними елементами та частково перетвориться в теплову на активному опорі:

$$\frac{e_a^{02} C_a}{2} = \frac{u_{Ca}^{02} C_a}{2} + R_a \int_0^{\infty} i_a^2(t) dt + 0 + \frac{u_{Cs}^{02} C_s}{2}.$$

Розряд до нульової напруги $u_{Ceq}^{\infty} = 0$ відповідає рівності за значенням та протилежності за знаком напруг

$$u_{Ca}^{\infty} = -u_{Cs}^{\infty} = u^{\infty}.$$

З урахуванням цього можна записати:

$$\frac{e_a^2 C_a}{2} = \frac{(u^{\infty})^2 (C_a + C_s)}{2} + R_a \int_0^{\infty} i_a^2(t) dt.$$

Отже, напруга на конденсаторах визначиться виразом

$$u^{\infty} = \sqrt{\left(\frac{E_n^2 C_a}{2} - R_a \int_0^{\infty} i_a^2(t) dt \right) \frac{2}{(C_a + C_s)}}. \quad (5)$$

Втрати енергії в контурі визначимо інтегруванням потужності втрат за часом на інтервалі від нуля до нескінченності:

$$\begin{aligned} W_{Ra} &= R_a \int_0^{\infty} i_a^2(t) dt = \\ &= R_a \int_0^{\infty} \left(\frac{e_a^0}{L_a(p_1 + p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \right)^2 dt. \end{aligned}$$

Після обчислення підінтегрального виразу й підстановки аргументів p_1 і p_2 на інтервалі інтегрування втрати енергії на активному опорі визначається виразом

$$W_{Ra} = \frac{e_a^{02} C_{eq}}{2}. \quad (6)$$

Виходячи з цього, відповідно до виразу (5), напруга на кожному з конденсаторів:

$$\begin{aligned} u^{\infty} &= \sqrt{\left(\frac{e_a^{02} C_a}{2} - \frac{e_a^{02} C_{eq}}{2} \right) \frac{2}{(C_a + C_s)}}, \\ u^{\infty} &= e_a^0 \sqrt{\frac{C_a - C_{eq}}{C_a + C_s}}. \end{aligned}$$

Або, повертаючись до параметрів двигуна,

$$u^{\infty} = e_a^0 \frac{1}{1 + C_s \frac{k\Phi^2}{J_{\Sigma}}}. \quad (7)$$

Кількість енергії, яка переходить на накопичувальний конденсатор:

$$W_{Cs} = \frac{u^{\infty 2} C_s}{2}. \quad (8)$$

Таким чином, при гальмуванні машини постійного струму на накопичувальний конденсатор її е.р.с. знижується до скінченної величини, обумовленої виразом (7), тобто гальмування якоря машини постійного струму на накопичувальну ємність до зупинки не призводить.

На підставі виразів (3, 4, 6–8) на рис. 4 наведено залежності розподілу енергії в елементах схеми заміщення (рис. 2) (двигун ДПЭ-82а $P_n = 190 \text{ кВт}$;

$U_n = 270 \text{ В}$; $I_n = 760 \text{ А}$; $n_n = 740 \text{ об/хв}$) по закінченню перехідного процесу при різних значеннях ємності накопичувального конденсатора (суцільна).

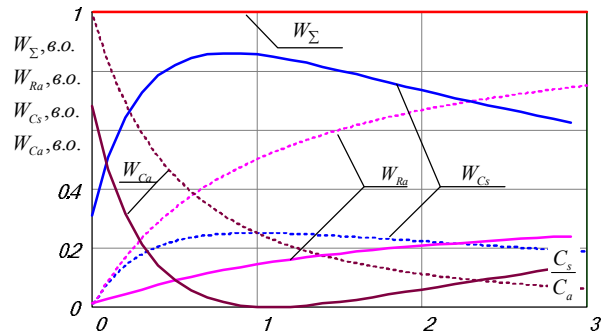


Рисунок 4 – Розподіл енергії в схемі (рис. 2) при різних ємностях накопичувального конденсатора

З графіків випливає, що найбільша кількість енергії, яка запасється конденсатором C_s , при гальмуванні машини забезпечується при рівності $C_s = C_a$, подальше збільшення ємності конденсатора призводить до росту втрат енергії на активному опорі, зменшенню запасу енергії обертового якоря й зниженню енергії конденсаторного накопичувача $C_{i\bar{e}r}$. Таким чином, з позиції накопичення енергії такий режим є найефективнішим, при цьому

$$W_{Ca}^{\infty} = 0,25W_{\Sigma}^0; W_{Ra}^{\infty} = 0,5W_{\Sigma}^0; W_{La}^{\infty} = 0; W_{Cs}^{\infty} = 0,25W_{\Sigma}^0.$$

За умов аналізу перехідних процесів виділяють два характерні: аперіодичний та коливальний, що справедливо й для зміни параметрів режиму машин постійного струму та зумовлюється коренями характеристичного рівняння [1, 6, 7]. Зміну параметрів під час гальмування за прийнятих умов для двигуна ДПЭ-82а наведено на рис. 5.

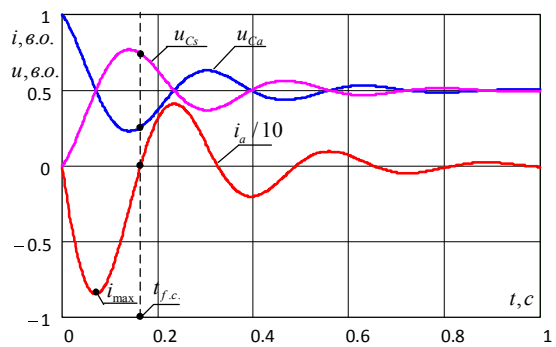


Рисунок 5 – Зміна у часі параметрів режиму якорного кола машини ДПЭ-82а за схемою рис. 2

Аналіз графіків показує, що за час, який відповідає напівперіоду вільної складової струму, напруга u_{Cs} має максимальне значення, а напруга u_{Ca} – мінімальне. Цей момент позначено часом першого сполучення $t_{f.\bar{n}}$. Розподіл енергії при цьому є найефективнішим, подальший процес призводить лише до додаткових коливань та втрат. Зважаючи на корені характеристичного рівняння (2), час першого сполучення, що відповідає напівперіоду вільної складової струму, визначається виразом:

$$t_{f.\bar{n}} = \frac{\pi}{|\text{Im}(p_1)|}$$

Відповідно, напруги на конденсаторах:

$$u_{Ca}(t_{f.\bar{n}}) = \left(\frac{C_{eq} u_{Ca}^0}{C_a} \right) \left[- \left(\frac{\text{Re}(p_1) e^{\text{Re}(p_1) t_{f.\bar{n}}}}{|\text{Im}(p_1)|} \right) \times \sin(|\text{Im}(p_1)| t_{f.\bar{n}}) + e^{\text{Re}(p_1) t_{f.\bar{n}}} \cos(|\text{Im}(p_1)| t_{f.\bar{n}}) \right] + u_{Cs}^\infty;$$

$$u_{Cs}(t_{f.\bar{n}}) = - \left(\frac{C_{eq} u_{Ca}^0}{C_s} \right) \left[- \left(\frac{\text{Re}(p_1) e^{\text{Re}(p_1) t_{f.\bar{n}}}}{|\text{Im}(p_1)|} \right) \times \sin(|\text{Im}(p_1)| t_{f.\bar{n}}) + e^{\text{Re}(p_1) t_{f.\bar{n}}} \cos(|\text{Im}(p_1)| t_{f.\bar{n}}) \right] - u_{Cs}^\infty.$$

Максимальне значення струму:

$$i_{\max} = \frac{u_{Ce}^0}{|\text{Im}(p_1)| L_a} e^{\frac{\text{Re}(p_1) t_{f.\bar{n}}}{2}} \sin \left(|\text{Im}(p_1)| \frac{t_{f.\bar{n}}}{2} \right).$$

Таким чином, переривання перехідного процесу під час першого сполучення струму підвищує ефективність перерозподілу енергії на накопичуючих елементах, зокрема на C_s . Розподіл енергії за таких умов наведений суцільними кривими на рис. 4. У даному випадку максимальне значення енергії, що накопичується, $W_{Cs}^\infty = 0,85 W_\Sigma^0$, при цьому енергія втрат не перевищує $W_{Ra}^\infty = 0,3 W_\Sigma^0$. Наявні нульові значення енергії W_{Ce}^∞ , що відповідає нульовій е.р.с. та, відповідно, частоті обертання якоря, тобто повній його зупинці.

Практична реалізація вказаних режимів зумовлюється обмеженням максимального значення струму кола на рівні $i_{\max} \leq (3-5) I_n$. На рис. 6 наведено залежності максимального значення струму кола від ємності накопичувача для двох випадків: $L_a = L_{a.n.}$, $L_a = 10 L_{a.n.}$.

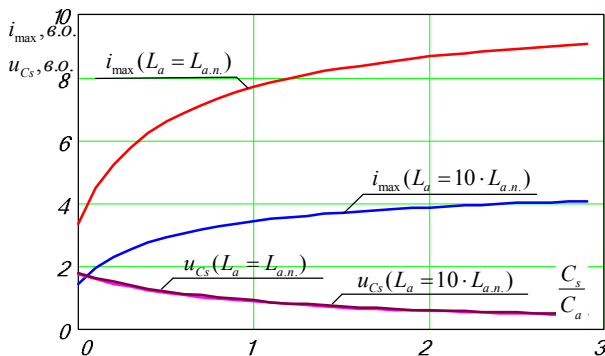


Рисунок 6 – Залежність максимального струму кола та напруги на накопичувачі від його ємності для двох значень індуктивності

Таким чином, зміна індуктивності кола значним чином впливає на значення струму i_{\max} , у той же час незначно знижуючи напругу на накопичуючому конденсаторі u_{Cs} , фактично не впливаючи на кількість залишкової енергії.

Як свідчить графічна залежність на рис. 7, зміна індуктивності є ефективною в діапазоні

$L_a = [1..10] L_{a.n.}$, подальше збільшення індуктивності недоцільне.

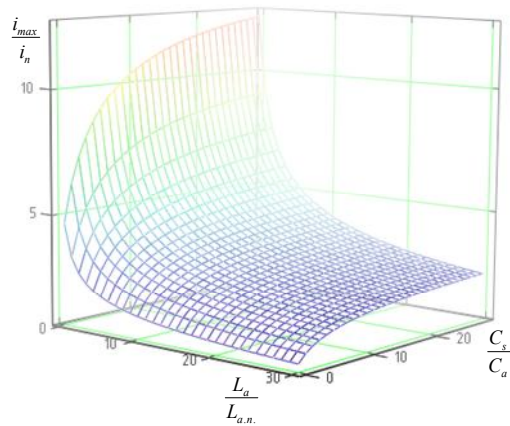


Рисунок 7 – Залежність максимального струму за умов зміни ємності накопичувача та сумарної індуктивності кола

Зважаючи на те, що значення додаткової індуктивності велике, таке вирішення задачі обмеження струму не раціональне. Більш ефективним є використання напівпровідникового перетворювача (наприклад, паралельний чи послідовний ШПП) для керування процесом та обмеження струму.

ВИСНОВКИ. 1. При безпосередньому підключенні конденсаторного накопичувача до якоря машини постійного струму для реалізації гальмівного режиму струм приймає неприпустимі значення, що вимагає застосування системи регулювання гальмового струму.

2. Збільшення ємності конденсаторного накопичувача для збільшення кількості енергії, що накопичується, не дає позитивного результату, оскільки збільшуються втрати енергії на активному опорі кола під час перехідного процесу. Залежність енергії, яка запасастється накопичувачем, має максимальне значення за умов рівності ємностей накопичувача і джерела енергії.

3. Раціональним є переривання процесу гальмування для зменшення втрат енергії та підвищення ефекту накопичення енергії в момент часу, який відповідає першому сполученню струму зі сталим (нульовим) рівнем. Реалізація такого способу значно знижує втрати енергії та зменшує час гальмування.

4. Обмеження струму шляхом введення додаткової індуктивності доцільне лише для $L_a = [1..10] L_{a.n.}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизированный электропривод / Под ред. Ильинского И.Ф., Юнькова М.Г. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
2. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. – М.: Энергия, 1977. – 128 с.
3. Бут Д.А. и др. Накопители энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 397 с.

4. Кожушок Г.Н. Про використання ємнісних накопичувачів для підвищення економічності транспортних засобів з електромеханічною трансмісією // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2002. – Вип. 2/2003 (19). – С. 116–121.

5. Родькин Д.И. Системы динамической нагрузки и диагностики электродвигателей в условиях послеремонтных испытаний. – М.: Недра, 1992. – 236 с.

6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Гардари, 2003. – 317 с.

7. Дунаевский С.Я., Крылов О.А., Мазия Л.В. Моделирование элементов электромеханических систем. – М.: Энергия, 1982. – 288 с.

8. Patent EP2200150A1 Electric vehicle 23.06.10. Bulletin 2010/25 Sugimoto, Tetsuya Toyota-shi, Kondo, Yoshihito Toyota-shi, Sugiura, Koichi Toyota-shi.

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF ENERGY IN MACHINES BRAKING MODE DIRECT CURRENT CAPACITOR CONNECTION TO DRIVE ANCHORS

O. Bialobrzeskyi

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: seemAl@kdu.edu.ua

The analysis of processes transformation energy is lead to armature circuits of a direct current machine connected to the condenser store. On the basis of transient analysis in a circuit, graphic dependences for a partition of energy are received at a variation in capacity of the energy storage capacitor. The expediency the termination of process in a point first interface of a current with zero, on the basis of what dependences an energy distribution in devices are improved. As a result of the analysis in time dependence of change a current requirements on restriction of a current are formulated and directions of their realization are certain.

Key words: the continuous-current machine, the condenser store, energy of braking, restriction of a current.

REFERENCES

1. *The automated electric drive* / Ed. by Pliyinskyi I.F., Yunkov M.G. – М.: Energoatomizdat, 1990. – 544 p. [in Russian]

2. Gegelenko I.V. *Merit number of the electric power at the industrial enterprises*. – М.: Energiya, 1977. – 128 p. [in Russian]

3. But D. and oth. *Energy storage units*. – М.: Energoatomizdat, 1991. – 397 p. [in Russian]

4. Kozhushok G.N. About use of capacitor stores for a formance gain of vehicles with electromechanical transmission // *Bulletin of the Kremenchuk State Polytechnical University. Scientific works of the Kremenchuk State Polytechnical University*. – Kremenchuk: KSPU, 2002. – Iss. 2/2003 (19). – PP. 116–121. [in Ukrainian]

5. Rodkin D.I. *Sistem of dynamic loads and diagnostics of electric motors at after repair tests*. – М.: Nedra, 1992. – 236 p. [in Russian]

6. Bessonov L.A. *Theoretical basis of a electro technics. The electromagnetic field*. – М.: Gardary, 2003. – 317 p. [in Russian]

7. Dunaevskij S.J., Krylov O.A., Mazia L.V. *Modelling the elements of electromechanical systems*. – М.: Energiya, 1982. – 288 p. [in Russian]

8. Patent EP2200150A1 *Electric vehicle* 23.06.10. Bulletin 2010/25 Sugimoto, Tetsuya Toyota-shi, Kondo, Yoshihito Toyota-shi, Sugiura, Koichi Toyota-shi.

Стаття надійшла 9.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Садовим О.В.