

МОДЕРНІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕКУПЕРАТИВНИМ ГАЛЬМУВАННЯМ ДЛЯ ЕЛЕКТРОВІЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗІ СТАТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Коротко викладено модернізацію функціональної схеми системи автоматичного керування рекупера­тивним гальмуванням для електровізів постійного струму у разі живлення обмоток збудження від статичного збуджувача.

Кратко изложена модернизация функциональной схемы системы автоматического управления реку­перативным торможением для электровозов постоянного тока при питании обмоток возбуждения от статическо­го возбудителя.

The article briefly expounds the upgrading of a functional chart of automatic control system of recuperative braking for DC electric locomotives with power supply of excitation windings coming from a static activator.

Для усунення недоліків, властивих існую­чим системам керування [1; 2], розроблено доповнення функціональної схеми системи автоматичного керування рекупера­тивним гальмуванням (САКРГ) для електровізів по­стійного струму із статичними перетворювачами (рис. 1).

Пропонована система створена з метою за­безпечувати раціональне, з погляду збільшення енергії повернення, гальмування в місцях, що наперед спланували. У всій решті випадків за­стосовується рекупера­тивне гальмування із зміною гальмівної сили по обмеженнях гальмі­вної характеристики.

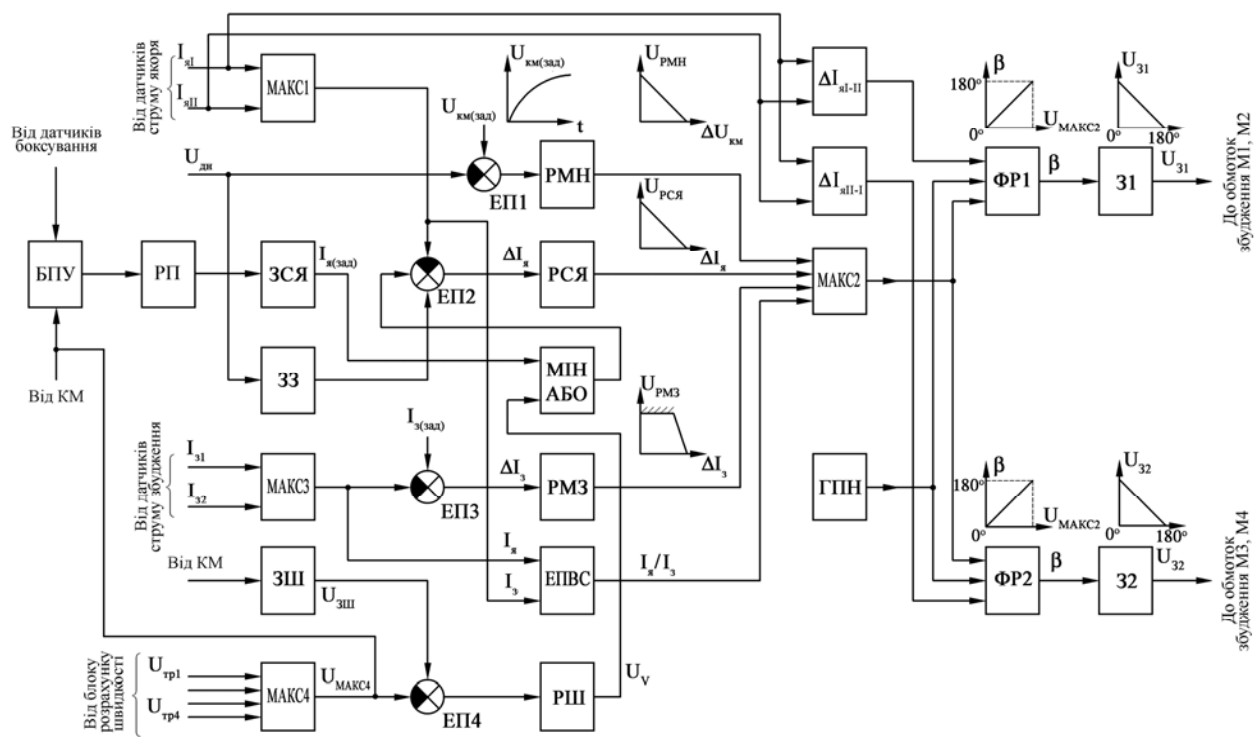


Рис. 1. Функціональна схема САКРГ для електровізів постійного струму з статичними перетворювачами

Система, що розробляється, володіє такими можливостями і нововведеннями:

- наявність мікроконтролера для розрахунку величини заданої гальмівної сили для кожної конкретної ділянки шляху і можливості обмеження швидкості руху електровоза;
- можливість плавного входу в режим рекуперації;
- наявність допоміжного кола підтримки постійності заданої швидкості в режимі рекуперативного гальмування;
- наявність кола вирівнювання струмів рекуперації між тяговими двигунами, що ввімкнуті паралельно в секціях електровоза;
- обмеження гальмівного зусилля при виникненні юза.

Пропонована система автоматичного керування рекуперативним гальмуванням складається з основного кола – кола регулювання по струму рекуперації; трьох віток зворотного зв'язку – по струму збудження, по відношенню струмів збудження і рекуперації, по максимальній напрузі на колекторах тягових двигунів; допоміжного кола – кола регулювання швидкості.

Принципова схема силового кола рекуперативного гальмування однієї секції на «П» з'єднанні наведена на рис. 2.

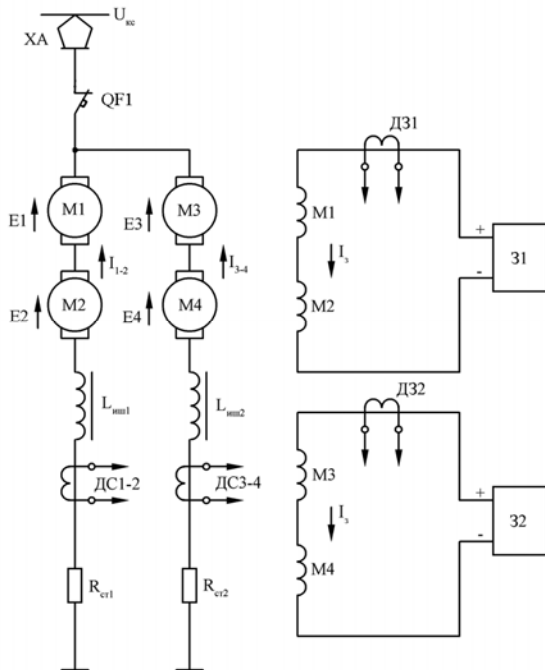


Рис. 2. Принципова схема силового кола при рекуперативному гальмуванні однієї секції електровоза на «П» з'єднанні

У кожному колі включені по два якорі тягових двигунів – М1, М2 і М3, М4. Послідовно якорній обмотці включені датчики струмів яко-

рів ДС1, 2 і ДС3, 4. Обмотки збудження тягових двигунів М1, М4 сполучені попарно послідовно і кожна пара обмоток збудження одержує живлення від свого збудника: М1, М2 від 31, М3, М4 від 32. Живлення обмоток збудження не змінюється на різних з'єднаннях тягових двигунів. Парне з'єднання обмоток збудження і живлення кожної пари від окремого статичного перетворювача забезпечує поліпшення розподілу струмів рекуперації між паралельно включеними тяговими двигунами в режимі рекуперації на «П» і «СП» з'єднаннях.

У колі обмоток збудження включені датчики струмів збудження ДЗ1 і ДЗ2. Вихідна напруга збудників 31 і 32 регулюється за допомогою сигналів керування фазорегуляторів ФР1 і ФР2.

Вхідними сигналами системи автоматичного керування режимами рекуперативного гальмування є: маса складу, необхідне уповільнення, кінцева швидкість при гальмуванні, середнє значення величини випрямленого ухилу, що задаються з пульта керування електровоза, а також сигнали датчиків струму якорів $I_{я1}$ і $I_{яII}$, датчиків струмів збудження $I_{з1}$ і $I_{зII}$, датчика напруги контактної мережі (або е.р.с. тягових двигунів) $U_{дн1}$, датчиків швидкості $U_{тр1}$, $U_{тр2}$, $U_{тр3}$, $U_{тр4}$, датчиків боксування.

Розглянемо дію нових або вдосконалених блоків САКРГ.

Блок початкових умов. У блок початкових умов (БПУ) з пульта керування вводяться значення маси складу, необхідне уповільнення, кінцева швидкість при гальмуванні, середнє значення величини випрямленого ухилу, а також з датчиків – поточна швидкість руху складу і напруга в контактній мережі, наявність боксування.

Розрахунковий пристрій. Сформований сигнал в БПУ подається у розрахунковий пристрій (РП), в якому провадиться обчислення необхідної величини гальмівної сили для гальмування по необхідному закону.

Використана наступна залежність для раціонального закону зміни гальмівної сили з погляду збільшення енергії повернення[2]:

$$B = \left[\frac{(V - V_1) \cdot [1 + k \cdot (V + V_1)] \cdot (B_2 - B_1)}{(V_2 - V_1) \cdot [1 + k \cdot (V_2 + V_1)]} \right] + B_1, \quad (1)$$

де $(V_1; B_1)$, $(V_2; B_2)$ – точки, через які проходить розрахункова крива другого порядку, що використовується для формування гальмівної характеристики; k – коефіцієнт деформації розрахункової кривої.

Гнучкий зворотній зв'язок. Дія від гнучкого зворотного зв'язку (33) з'являється тільки при стрибкоподібній зміні напруги в контактній мережі. При стрибкоподібному зменшенні напруги в контактній мережі 33 виробляє сигнал, що підвищує вихідну напругу РСЯ. Це спричиняє форсоване скидання струму збудження відповідно е.р.с. тягових двигунів і величина стрибка якірного струму буде знижена. У разі стрибкоподібного збільшення напруги в контактній мережі ОС виробляє сигнал, що знижує вихідну напругу РТЯ. Це спричиняє форсоване зростання струму збудження відповідно е.р.с. тягових двигунів і величина провалу якірного струму буде значно знижена.

Форма зміни напруги гнучкого зворотного зв'язку відповідає закону, що описується алгебраїчним рівнянням:

$$U_{33} = K_{33} \cdot U_{дн}, \quad (3)$$

де K_{33} – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку; $U_{дн}$ – величина поточної напруги на колекторах тягових двигунів, одержуване з датчика напруги, В.

Елементи вирівнювання навантажень. У разі порушення розподілу навантажень з'являються сигнали на елементах вирівнювання навантажень $\Delta I_{яI-II}$ і $\Delta I_{яII-I}$. Ці сигнали діють так, щоб струми якорів тягових двигунів були приблизно однаковими. Наприклад, якщо зменшився струм $\Delta I_{яI}$, а інший $\Delta I_{яII}$ залишився тим самим, то на вхід фазорегулятора ФР1 подасться

додатковий негативний сигнал від $\Delta I_{яI-II}$, який зменшить кут регулювання ФР1, спричиняючи збільшення струму збудника 31 і збільшення струму $\Delta I_{яI}$. На вхід ФР2 буде поданий додатковий позитивний сигнал, що зменшує струм збудника 32, і отже зменшиться струм $\Delta I_{яII}$. Таким чином, струми в кожній вітці якорів виявляться приблизно однаковими.

Форма зміни напруги на виході елемента вирівнювання навантажень $\Delta I_{яI-II}$ відповідає закону, що описується алгебраїчним рівнянням:

$$U_{\Delta I_{яI-II}} = K_{\Delta I_{яI-II}} (I_{яI} - I_{яII}), \quad (3)$$

де $K_{\Delta I_{яI-II}}$ – коефіцієнт передачі елемента вирівнювання навантажень $\Delta I_{яI-II}$, Ом; $\Delta I_{яI}$, $\Delta I_{яII}$ – сигнали датчиків струмів якоря відповідних тягових двигунів.

Форма зміни напруги на виході елемента вирівнювання навантажень $\Delta I_{яII-I}$ відповідає закону, що описується алгебраїчним рівнянням:

$$U_{\Delta I_{яII-I}} = K_{\Delta I_{яII-I}} (I_{яII} - I_{яI}), \quad (4)$$

де $K_{\Delta I_{яII-I}}$ – коефіцієнт передачі елемента вирівнювання навантажень $\Delta I_{яII-I}$, Ом; $\Delta I_{яI}$, $\Delta I_{яII}$ – сигнали датчиків струмів якоря відповідних тягових двигунів.

Враховуючи наведений вище математичний опис елементів, що входять в систему автоматичного керування, складемо систему диференціальних рівнянь, яка і буде математичною моделлю розробленої САКРГ [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\text{МАКС2}}(t) = \begin{cases} U_{\text{РМН}} - K_{\text{РМН}} \cdot \left(u_{\text{ДН}}(t) - U_{\text{км(зад)}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{m}} \right) \right), & \text{if } U_{\text{ДН}} \geq U_{\text{км(зад)}} \\ K_{\text{РМЗ}} \cdot (i_3(t) - I_{3(\text{зад})}), & \text{if } i_3(t) \geq I_{3(\text{зад})} \\ K_{\text{ЕПВС}} \cdot \begin{pmatrix} i_я(t) \\ i_3(t) \end{pmatrix} - K_{\text{T}}, & \text{if } \begin{pmatrix} i_я(t) \\ i_3(t) \end{pmatrix} \geq K_{\text{T}} \\ U_{\text{РСЯ}} - K_{\text{РСЯ}} \cdot \left(\frac{B \cdot R_{\text{кп}} \cdot \eta_{3\text{п}}}{\mu_{\text{ред}} \cdot c_{\text{м}} \Phi} - i_я(t) \right) & \text{otherwise} \end{cases} \\ \beta = u_{\text{МАКС2}}(t) \cdot K_{\text{ФР}} \\ L_3 \cdot \frac{du_3(t)}{dt} = \frac{(1-\beta) \cdot u_{\text{км}}(t)}{N \cdot K_{\text{тр}}} - u_3(t) \cdot R_3 \\ L_{\text{оз}} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} = u_3(t) - i_3(t) \cdot R_{\text{оз}} \\ L_я \cdot \frac{di_я(t)}{dt} = c\Phi(i(t)) \cdot \omega_{\text{дв}}(t) - u_{\text{км}}(t) - i_я(t) \cdot R_я \\ J \cdot \frac{d\omega_{\text{дв}}(t)}{dt} = \frac{M_{\text{п}} \cdot R_{\text{кп}} \cdot g \cdot \eta_{3\text{п}} \cdot (i_c - \omega_0)}{\mu_{\text{ред}} \cdot c_0 \cdot 10^3} - c\Phi(i(t)) \cdot i_я(t) \end{array} \right. , \quad (5)$$

де U_{PMH} , – сигнал на виході блока регулювання за рівнем напруги в мережі РМН, В; U_{PM3} – сигнал на виході блока регулювання струму збудження (РМЗ), В; U_{EPBC} – сигнал на виході блока ЕПВС, В; U_{PCJA} – сигнал на виході блоку РСЯ в головному колі керування, В; $K_{ФР}$ – постійний коефіцієнт передачі фазорегуляторів; $I_{я}(t)$ – значення струму в обмотці якоря тягового двигуна, А; $I_{3}(t)$ – значення струму в обмотці збудження тягового двигуна, А; $U_{3}(t)$ – вихідна напруга збудника, В; L_{3} – індуктивність внутрішніх кіл збудника, Гн; β – кут регулювання; $U_{KM}(t)$ – значення напруги в контактній мережі, В; N – кількість силових комірок перетворювача, од; $K_{ТР}$ – коефіцієнт трансформації трансформатора; R_{3} – внутрішній опір збудника, Ом; $L_{я}$, L_{O3} – відповідно середні значення індуктивностей якорного кола і обмотки збудження тягового двигуна, Гн; $R_{я}$, R_{O3} – відповідно активні опори якорного кола і обмотки збудження тягового двигуна, Ом; $\omega_{дв}$ – кутова швидкість обертання вала тягового двигуна, c^{-1} ; J – момент інерції поїзда, зведений до валу тягового двигуна, $кгм^2$; $M_{п}$ – маса поїзда, кг; $\eta_{зп}$ – ККД тягової передачі; Φ – магнітний потік головних полюсів, Вб; c – конструктивна стала двигуна; c_0 – кількість осей електровоза; $R_{кп}$ – радіус колісної пари, м.

Для розрахунку перехідних процесів та для отримання графіків залежностей $i_{я}(t)$, $i_{3}(t)$ використані відповідні програми розроблені Устіменко Д. В [2]. Для розрахунків використовувався пакет програм MathCAD 2003 PRO. Для інтегрування системи диференціальних рівнянь була використана вбудована функція Rkadapt(v , x_1 , x_2 , points, D), що повертає матрицю рішень диференціального рівняння, вказаного похідними в D , і що має початкові умови v на інтервалі $[x_1, x_2]$ по методу адаптивного кроку Рунге-Кутта.

Проаналізуємо залежності, отримані в результаті розрахунку перехідних процесів, з метою перевірки працездатності розробленої системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням.

На графіках залежностей $i_{я}(t)$, $i_{3}(t)$ (рис. 3, 4 відповідно), показаний момент різкої зміни напруги в контактній мережі на величину ΔU_{KM} (500 В, 400 В, 300 В, 200 В, 100 В) на «С» з'єднанні тягових двигунів при швидкості $V = 22$ км/год і напрузі в контактній мережі 3 300 В при струмі рекуперації $I_p = 279$ А.

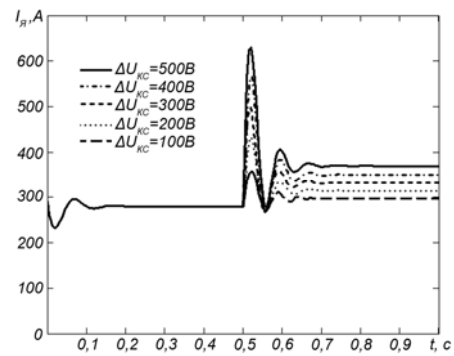


Рис. 3. Залежність струму якоря від часу, з різними значеннями стрибка напруги контактної мережі

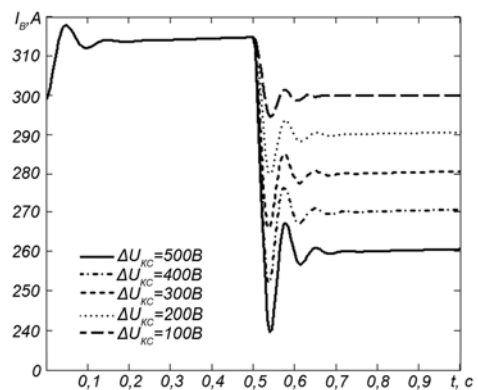


Рис. 4. Залежність струму збудження від часу, з різними значеннями стрибка напруги контактної мережі

Як можна побачити з результатів розрахунку, жодного разу стрибок струму не сягнув критичного значення – величини двократного номінального струму двигуна (для тягового двигуна ЭД141АУ1 $2I_H = 1130$ А), максимальна його величина склала $I_{я} = 627$ А при стрибку напруги контактної мережі $\Delta U_{KM} = 500$ В, тривалість перехідного процесу склала 0,26 с, струм збудження змінився з $I_3 = 315$ А до $I_3 = 260$ А, тобто збудження зменшилося на 17,5 %.

Отримані результати свідчать про дієздатність розробленої САКРГ.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Висин Н. Г. Функциональная схема системы автоматического управления рекуперативным торможением для электровозов со статическими преобразователями / Н. Г. Висин, Б. Т. Влащенко, А. И. Кийко // Вісник ДПТУ. – Д., 2003. – Вип. 1. – С. 36–40.
2. Устіменко Д. В. Підвищення ефективності тяги поїздів шляхом удосконалення системи рекуперативного гальмування: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Д., 2006.

Надійшла до редколегії 03.01.2007.