

УДК 629

МОДЕЛЮВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВУ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ У СИЛОВОМУ ЛАНЦЮГУ

Яровий Р.О.

MODELING TRACTION ELECTRIC DRIVE SHUNTING LOCOMOTIVES WITH ENERGY STORAGE IN THE POWER CIRCUIT

Yarovoy R.

Розглянуто питання, яке пов'язані із створенням математичної моделі обміну електроенергії між накопичувачем електроенергії та приводом рухомого складу, також розглянуто питання пов'язані із створенням математичної моделі електромеханічної системи дизель-поїзда зі тяговим електроприводом із врахуванням пружних зв'язків у його елементах та взаємодії колісних пар з рейками. Запропоновано цифрове моделювання режимів роботи системи.

Ключові слова: рухомий склад, математична модель, електродинамічне гальмування, накопичення енергії, гібридний привод.

Постановка проблеми. Згідно з дослідженнями, проведеними в області розробки сучасних видів залізничного транспорту як у нашій країні, так і за кордоном, однією з актуальних завдань є завдання побудови ефективних систем управління, що забезпечують зменшення витрат палива та електроенергії і обмеження впливу локомотива на залізничну колію [1, 2]. Особливо це відноситься до маневрових локомотивів з електроприводом постійного струму та накопичувачем електроенергії у силовому ланцюгу. В Україні процес створення такого типу локомотивів знаходиться на рівні розробки експериментального зразка дизель-поїзда. Однією з проблем при створенні локомотивів з накопичувачем електроенергії у силовому ланцюгу, зокрема їх систем управління, що забезпечують економію палива, знизити шкідливі викиди, дозволяють з великою точністю підтримувати швидкість руху на ухилі, полегшити процес управління гальмуванням, отримання мінімального впливу тягових одиниць на залізничну колію.

Зважаючи на конструктивних особливостей маневрових локомотивів з накопичувачем електроенергії у силовому ланцюгу, потрібно детальне дослідження динаміки локомотива з метою розробки ефективних систем управління, що забезпечують ефективну

дію гальма в робочому діапазоні швидкостей руху локомотива; гнучкість управління і автоматичне регулювання за заданими характеристиками з урахуванням обмежень; мінімальна витрата палива дизелем в процесі гальмування; малий час підготовки до гальмування; стійкість режимів гальмування; мінімальне ускладнення конструкції електропередачі та її вартості при високій надійності роботи [3].

Для проведення комплексних досліджень з метою розробки ефективних систем управління, найбільш підходящим інструментом є математичні моделі як самого об'єкта в цілому, так і його окремих енергетичних компонент, блоків і вузлів [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі розробки і дослідження моделей електромеханічної системи з гібридним електроприводом присвячено ряд робіт [3 - 4]. При дослідженні електромеханічної системи дизель-потягу з накопиченням електроенергії у силовому ланцюгу практичний інтерес представляє математична модель обміну електричної енергії між тяговим двигуном (ТД) та накопичувачем електроенергії, та модель що враховує реалізацію моменту обертання тягового двигуна (ТД) при взаємодії колісних пар з рейками, зокрема у результаті електродинамічного гальмування.

Провідні виробники локомотивів наділяють значну увагу розробці тепловозів з гібридним силовим приводом, що дозволяють суттєво знизити непродуктивні втрати енергії. Такі роботи проводять: в Україні ПАТ «Луганськтепловоз» експериментальний тепловоз ТЕМ106 з енергозберігаючою (гібридною) силовою установкою забезпечує до 50% економії палива і на 80% зменшує викиди шкідливих речовин в атмосферу. У країнах СНД «Транс-машхолдинг» експериментальний тепловоз ТЕМ18ДМ. Зарубіжні аналоги Маневровий тепловоз GG20B (Green Coat) виробництва компанії Rail Power Technologies США і поновлення тепловоза серії BR202 компанія Alstom Locomotive Servis -

спільне підприємство Alstom Transport і залізниць Німеччини[5].

Мета. Метою роботи є створення математичної моделі електромеханічної системи приводу маневрового локомотива з урахуванням накопичувача енергії у силовому ланцюгу та взаємодії колісних пар з рейками, що дозволяє проводити дослідження на стадії проектування і здійснювати синтез системи регулювання тяговим електроприводом.

Результати досліджень. У даній роботі об'єктом дослідження є привод маневрового локомотиву. Структурна схема механічної частини приводу наведена на рис. 1.

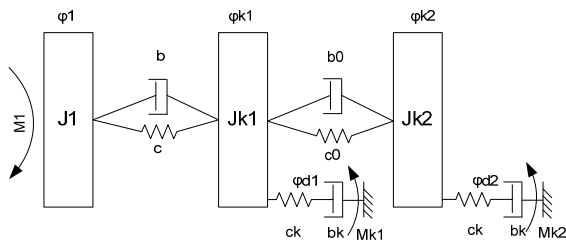


Рис. 1. Структурна схема механічної системи ТЕД - колісна пара:

$J1, Jk1, Jk2$ моменти інерції відповідно якоря ТЕД та колісної пари; c, c_0, c_k пружністю зв'язку між відповідними ланками; b, b_0, b_k дисипативні властивостями зв'язку між відповідними ланками.

Підсистемою моделі екіпаж - тяговий електропривод - шлях будемо як сукупність обертаємих механічно взаємопов'язаних тіл, що утворюють систему з зосередженими пружно-дисипативними і інерційними параметрами, що включає якір ТЕД, сполучне вали, пов'язані і передаточні механізми, тягові редуктори, пов'язані з колісною парою, і колісну пару.

Для математичного опису руху j -ї кутовий підсистеми доцільно використовувати рівняння Лагранжа другого роду, вибрав в якості узагальнених координат абсолютні кути ϕ_{ki} . Повороту відповідних мас підсистеми, виключивши обертання зазначених мас при русі локомотива з постійною швидкістю V .

Важливе значення для остаточного формування моделі j -ї кутовий підсистеми має правильний вибір структури її зв'язку з рейками. При аналізі кутових коливань приводу досить враховувати нормальну та подовжню складові реакції рейок на j -е колесо.

Для аналізу динамічних процесів в тягових приводах використовують різні структури подовжнього зв'язку коліс з рейками.

Диференціальні рівняння, що описують рух моделі, в загальному випадку мають вигляд

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\phi}_1 + b \dot{\Delta}_1 + c \Delta_1 = M(\dot{\phi}_1) + M_1(t) \\ \Delta_1 = \phi_1 - \phi_{k1}; \quad \dot{\Delta}_1 = \frac{d\Delta_1}{dt}; \\ J_1 \ddot{\phi}_{ks} - \delta_s (b \dot{\Delta}_1 + c \Delta_1) - (-1)^s (c_0 \Delta_0 + b_0 \dot{\Delta}_0) + c_k (\phi_{ks} - \phi_{ds}) = -\delta_3 M_1(t); \\ c_k (\phi_{ds} - \phi_{ks}) = -b_k (\dot{\phi}_{ds}) \dot{\phi}_{ds} + M_{ks}(t); \\ \Delta_0 = \phi_{k1} - \phi_{k2}; \quad \delta_1 = 1, \quad \delta_2 = 0 \text{ при } s = 1, 2, \end{cases}$$

Де $M(\dot{\phi}_1)$, $M_1(t)$ та $M_{ks}(t)$ відповідно статична характеристика ТЕД, збуджуючі моменти, що діють на якір ТЕД з боку електричних ланцюгів або передавальних механізмів, і на s -е колесо з боку шляху; ϕ_1, ϕ_{ks} та ϕ_{kd} - кути повороту відповідних елементів моделі без урахування поступального руху локомотива.

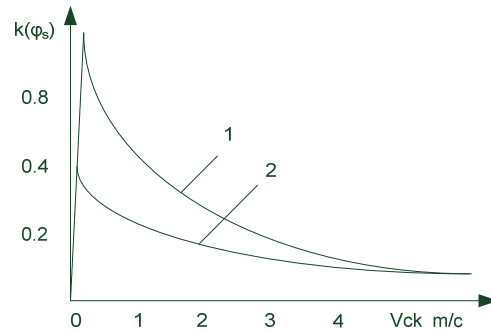


Рис. 2. Характеристика зчеплення коліс локомотива з рейками: 1 - $\dot{\phi}_s > 0$; 2 - $\dot{\phi}_s < 0$;

Форму падаючої ділянки характеристики зчеплення можна прийняти постійною в інтервалі швидкості локомотива $V = 5 \dots 50$ км/год, при якій реалізуються близькі до максимальних тягові зусилля і можливо боксування колісних пар. Крутизна ділянки псевдоквадрата, потенційного (максимального) коефіцієнта зчеплення в залежності від швидкості локомотива може бути обрана за допомогою експериментальних даних.

На рис. 3. представлена схема заміщення ланцюга для розрахунку показників роботи електроприводу при зміні кутової швидкості колінчастого вала дизеля ω_d або при досягненні заданого значення ω_d але при неповністю зарядженому накопичувачі. Для перехідних процесів розглянутої ланцюга другий закон Кірхгофа можна записати як:

$$\begin{cases} I_T R_T + (I_T + I_{II}) R_{ED} + L_{ED} \left(\frac{dI_{II}}{dt} + \frac{dI_T}{dt} \right) = U_T - E_{ED} \\ I_{II} R_{II} + (I_T + I_{II}) R_{ED} + L_{ED} \left(\frac{dI_{II}}{dt} + \frac{dI_T}{dt} \right) = U_{II} - E_{ED} \end{cases}$$

- де I_T - струм живлення ТЕД від ТГ
- R_T - опір у ланцюгу від ТГ до ТЕД
- U_T - напруга на ТГ
- I_{II} - струм живлення ТЕД від перетворювача
- U_{II} - напруга на перетворювачі
- R_{II} - опір у ланцюгу від перетворювача до ТЕД
- R_{ED} - опір обмоток ТЕД
- L_{ED} - індуктивність опір обмоток ТЕД
- E_{ED} - ЕДС ТЕД

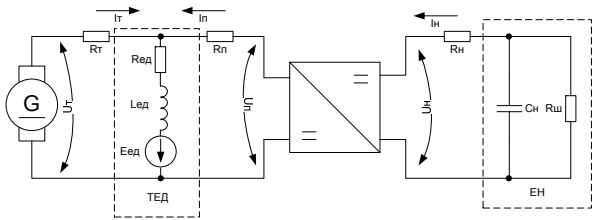


Рис. 3. Розрахункова схема електроприводу дизель-потягу з накопичувачем енергії

З системи рівнянь отримуємо:

$$U_T - U_{II} = I_T R_T - I_{II} R_{II}$$

Продифференціював отримане рівняння за часом з урахуванням прийнятих припущень, отримуємо:

$$\frac{dI_T}{dt} = \frac{dI_{II}}{dt} \frac{R_{II}}{R_T}$$

Підставимо отримане рівняння у систему:

$$\begin{cases} \frac{dI_T}{dt} = \frac{U_T - E_{ED} - I_T R_T - I_{II} R_{ED} - I_{II} R_{ED}}{L_{ED} \left(1 + \frac{R_T}{R_{II}}\right)} \\ \frac{dI_{II}}{dt} = \frac{U_{II} - E_{ED} - I_{II} R_{II} - I_T R_{ED} - I_{II} R_{ED}}{L_{ED} \left(1 + \frac{R_{II}}{R_T}\right)} \end{cases}$$

Результати цифрового моделювання для гальмування і розгону ЕРС наведено на рис. 4.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що показники обміну енергією не суперечать фізичним закономірностям протікання цих процесів. Істотний вплив на процеси накопичення і видачі енергії надають коефіцієнт регулювання перетворювача β і коефіцієнт регулювання ЕРС накопичувача k . Для оцінки ступеня впливу цих показників, як і інших електричних параметрів накопичувача, необхідно визначитися з критерієм оцінки процесів обміну енергією між накопичувачем і системою тягового приводу ЕПС. В якості такого критерію пропонується коефіцієнт ефективності процесів обміну

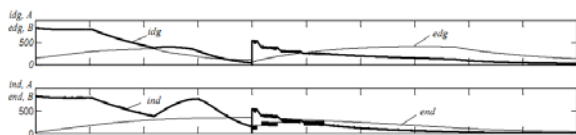


Рис. 4. Результати цифрового моделювання

Висновок. Стан тягового рухомого складу залізничного транспорту має відповідати найвищим технічним вимогам, а також вимогам економічності, надійності і безпеки. Дане завдання не може бути ефективно вирішене без застосування найсучасніших засобів про-

ектування систем управління та діагностики. Оскільки жодна сучасна система управління неможлива без проведення багатофакторного математичного моделювання, у статті побудована багатофакторна математична модель дизель-генератора, застосовуваного на вітчизняних маневрових тепловозах, на прикладі тепловоза ЧМЕЗ-Т з системою електродинамічного гальмування.

Математична модель включає в себе наступні складові:

- Математична модель механічної системи ТЕД – колісна пара;

- Математична модель електричної системи ТЕД – накопичувач енергії;

Математичне моделювання забезпечує відпрацювання критичних режимів, імітацію можливих дефектів функціонування системи, імітацію наближених до аварійних режимів, відпрацювання конструкції та ін. Імітаційне математичне моделювання дизель-генератора маневрового тепловоза суттєво економить час на конструкторсько-технологічну відпрацювання виробу і зменшує невизначеність знань про об'єкт.

Л і т е р а т у р а

1. Павленко А.П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов. – Москва.: Машиностроение, 1991.-192с.
2. Камаев А.А., Цыкин П.К. Математическое моделирование качения колес в групповом приводе локомотива. – Сб. Тр. Брянского институт транспорта. машиностроения. – 1974. – Вып. 26. – С. 103–106.
3. Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Запоровский Н.И., Леонов С.Ю. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. – Харьков: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с.
4. Кожевников В.А. Область тормозных режимов тягового электродвигателя / В.А. Кожевников // Сб. Лен. инста инженеров ж.д. транспорта. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – Вып. 159. – С. 178 – 189.
5. Кошевой В.А. Реостатный тормоз для грузовых тепловозов / В.А. Кошевой, В.П. Терещенко, Л.К. Филиппов // Железнодорожный транспорт. – М.: Транспорт, 1980. - №7. – С. 19 – 22.
6. Коссов Е.Е. Влияние эффективности накопителя энергии на топливную экономичность локомотива Е.Е. Коссов, В.А. Азаренко, А.Н. Корнев, М.М. Комарницкий // Локомотивинформ. – Харьков: Техностандарт. - №3, 2008. – С. 44 – 45.
7. Golubenko A. Energy of diesel locomotive's electrodynamic braking for increase of efficiency of diesel locomotive engines / A. Golubenko, V. Mogila, H. Nozhenko // Coll. of scientific labours. - 2007. – Issue 69. – P. 147 - 153
8. Могила В. И. Использование бросовой энергии торможения тепловоза для повышения эффективности тепловозных дизелей / В.И. Могила, Е.С. Ноженко // Сб. науч. трудов. УкрГАЗТ – Харьков: Из- во УкрДАЗТ, 2007. – Вып.82. – С. 153-157.

R e f e r e n c e s

1. Pavlenko AP Dynamics of traction drives ma-haul locomotives. - Moscow .: Engineering, 1991.-192s.
2. Kamaev AA, Tsykin PK Mathematical fashion-lation rolling wheels in the group drive Lokomo-Tiva. - Sat. Tr.

- Bryansk Institute of Transport. parking structure. - 1974 - Vol. 26. - P. 103-106.
3. Noskov VI, Dmitrienko VD, Zapolovsky NI Leonov SY Simulation and optimization of management and control systems of locomotives. - Kharkov: KhPhi "Transport of Ukraine", 2003. - 248 p.
 4. Kozhevnikov VA Region brake mode traction motor / VA Kozhevnikov // Proc. Len. INS-ta railway engineers transport. - M.: Transzheldorizdat, 1958. - Vol. 159 - S. 178 - 189.
 5. Koshevoy VA Rheostat brake for freight locomotives / VA Koshevoi VP Tereshchenko, LK Phi-Lippe // Rail. - M.: Transport, 1980. - №7. - S. 19 - 22.
 6. Kossov EE Influence the efficiency of energy storage for fuel efficiency locomotive EE Koss, VA Azarenka, AN Kornev, MM Komarnicki // Lokomotivinform. - Kharkov: Technostandart. - №3, 2008. - S. 44 - 45.
 7. Golubenko A. Energy of diesel locomotive's electrodynamic braking for increase of efficiency of diesel locomotive engines / AA Golubenko, V. Mogila, H. Nozhenko // Coll. of scientific labours. - 2007. - Issue 69. - P. 147 - 153
 8. Grave VI Using junk locomotive braking energy to improve the efficiency of TE plovoznih diesel / VI Tomb, ES Nozhenko // Proc. on-account. works. UkrGAZHT - Kharkiv: Due to UkrDAZT, 2007. - Vyp.82. - S. 153-157.

Яровой Р.А. Моделирование тягового электропривода маневрового локомотива с накоплением энергии в силовых цепях.

Рассмотрены вопросы, которое связано с созданием математической модели обмена электроэнергии между накопителем электроэнергии и приводом подвижного состава, также рассмотрены вопросы, связанные с созданием математической модели электромеханической системы дизель-поезда с тяговым электроприводом с учетом жестких связей в его элементах и взаимодействия колесных пар с рельсами. Предложено цифровое моделирование режимов работы системы.

Ключевые слова: математическая модель, подвижной состав, электродинамическое торможение, накопление энергии, гибридный привод.

Yarovoy R. Modeling traction electric drive shunting locomotives with energy storage in the power circuit.

The questions, which is associated with the creation of a mathematical model of power sharing between the drive and the drive power to the rolling shutter, also discussed issues related to the creation of a mathematical model of electro-mechanical system theme diesel trains with electric traction with scientists-including hard links to it elements and interaction of wheel pairs with the rails. Suggested digital modeling modes of the system.

Since no modern control system is impossible without a multivariate mathematical modeling, the article is based multifactor mathematical model of diesel generator, used for domestic shunting locomotives, locomotive for example ChME3-T system with electrodynamic braking tub.

The mathematical model includes the following components:

- A mathematical model of the mechanical system TED - Wheelset;

- A mathematical model of the electrical system TED - energy storage;

Mathematical modeling provides critical testing regimes simulation of possible defects in the system, simulation close to the emergency operation, working construction and others. Simulation mathematical modeling genset locomotive shunting significantly saves time on design and technology testing you do, and reduces the uncertainty of knowledge about the object.

Keywords: mathematical model, rolling stock, electrodynamic braking energy storage, hybrid drive.

Яровой Р.О. – ст. викладач кафедри "Обчислювальної техніки і систем управління", УкрДАЗТ, м. Харків, Україна, e-mail: kzf_limani@bigmir.net.

Рецензент: д.т.н., проф. Соколов В.І.

Стаття подана 01.04.2015