

УДК 629.4.018

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗАХ****Яровий Р.О.****THE EFFECTIVENESS OF COMBINED STORAGE OF ELECTRICAL
ENERGY ON SHUNTING LOCOMOTIVES****Yarovoy R.**

В статті розглянуто питання ефективності застосування накопичувачів енергії на маневрових локомотивах типу ЧМЕЗ. Запропонована імітаційна модель маневрового локомотиву ЧМЕЗ, з комбінованим накопичувачем енергії у силовому ланцюгу, для розрахунку витрат палива. Представлені основні розрахункові блоки імітаційної моделі та взаємозв'язки між ними. У першому блоці розраховується тягова потужність локомотива на ободі колісної пари. Другий блок служить для визначення потужності двигуна, де враховуються втрати в силовій передачі і витрати потужності на допоміжні навантаження. Третій блок визначення стану накопичувача. Блок порівняння служить для узгодження енергетичних параметрів всіх компонентів силової установки локомотива. Далі проводиться оптимізація режимів роботи силової установки тепловоза по мінімуму витрати палива, яка здійснюється в блоці вибору оптимальної потужності дизеля і режимів його роботи. Цей блок пов'язаний з блоком визначення витрати палива, в якому використані аналітичні залежності витрати палива від потужності і частоти обертання. Отримана модель доводить що використання комбінованого накопичувача енергії у силовому ланцюгу маневрового локомотива дозволяє зменшити витрати палива на маневрову роботу.

Ключові слова: рухомий склад, електродинамічне гальмування, накопичення енергії, гібридний привід.

Вступ. Одним з інноваційних енергозберігаючих напрямків є застосування енергоємних накопичувачів енергії на маневрових локомотивах. Режим роботи з постійно змінним навантаженням і періодичним поєднанням тяги і гальмування в значній мірі схильні до високоєфективного використання накопичувачів. Їх застосування покращує проходження перехідних процесів одночасно в перетворювачах і приводі локомотивів. Вони також дозволять в найбільш повній мірі використовувати енергію рекуперативного гальмування, яка буде витрачатися при пуску рухомого складу. Завдяки кращим протилежним властивостям електродинамічний га-

льмo дозволяє реалізувати більш високі гальмівні зусилля, обмежені за умовами зчеплення коліс з рейками. Завдяки великій потужності електродинамічного гальма в ряді випадків можливе виконання службового гальмування одним лише локомотивом, без включення пневматичного гальма (ПТ) складу або з використанням її в мінімальному ступені. За допомогою накопичувача можна підвищити ефективність електричного гальмування на 15-20%, так як в якості споживача енергії використовується накопичувач на борту тепловоза.

Постановка проблеми. Основна проблема визначення ефективності використання накопичувачів енергії полягає в урахуванні багатьох факторів починаючи з профілю шліху і закінчуючи кількістю накопленої енергії у накопичувачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначенню та обґрунтуванню основних показників локомотивів присвячено багато наукових досліджень. В.П. Казанцев визначив вплив на рівень оптимальної потужності маневрових локомотивів і тривалості виконання розрахункової маневрової операції наступних факторів: маса складу, довжина і уклон елементів маневрового району, способи виконання маневрів [2]. В роботах М.Є. Гончарова було проведено ряд досліджень щодо визначення величини питомої гальмівної сили під час гальмування МТ і його сили тяги [3]. С. О. Нікіпелій в роботі [4] вирішував задачу підвищення якості робочого процесу дизеля в несталих режимах за рахунок використання накопичувача енергії у силовій мережі тепловозу. Також було теоретично обґрунтовано спосіб керування силовою установкою тепловоза з накопичувачем з метою зменшення необхідної розрахованої енергоємності накопичувача. В роботах Є.П. Лосєва [5] розглянуто спосіб вибору необхідних параметрів комбінованих силових установок локомоти-

вів на основі завантаження силових установок локомотивів при їх роботі на конкретних ділянках. Тепловий двигун забезпечує деяку середню потужність тепловозу, необхідну в експлуатації, а перевищення або дефіцит тягової потужності покривається накопичувачем, необхідна енергоємність якого визначається за тривалістю режимів зарядження і розрядження, а також за часткою потужності, яку має реалізувати накопичувач в цих режимах. Недоліком цього підходу є те, що при його використанні не враховуються багато факторів які впливають на параметри накопичувача.

Мета. Метою роботи є визначення ефективності використання комбінованого накопичувача енергії у силовому ланцюгу маневрового локомотиву.

Результати досліджень. Для визначення енергетичної ефективності комбінованих накопичувачів енергії при експлуатації тепловоза ЧМЕЗ на маневрових роботах була розроблена імітаційні моделі, що дозволяють за заданим режимом роботи тепловоза визначити необхідну потужність теплового двигуна і оцінити величину економії палива, що отримується в результаті застосування накопичувача енергії.

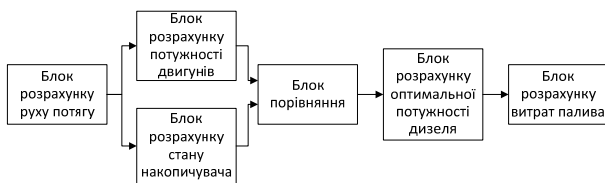


Рис. 1. Структурна схема для розрахунку ефективності використання накопичувача енергії

Схема математичних моделей для розрахунку ефективності представлена на рис. 1. На ній показано шість блоків.

У першому блоці розраховується тягова потужність локомотива на ободі колісної пари по відомим залежностям швидкості від шляху і тягової (гальмівний) характеристикі, або за заданим режимом ведення поїзда (позиції контролера, положенню гальмівного крана машиніста).

Другий блок служить для визначення потужності двигуна, де враховуються втрати в силовій передачі і витрати потужності на допоміжні навантаження.

Третій блоку визначення стану накопичувача (ступінь заряду, накопичена енергія).

Блок порівняння служить для узгодження енергетичних параметрів всіх компонентів силової установки локомотива. В цьому блоці містяться всі обмеження на параметри двигунів і накопичувача енергії. Залежно від потужності на ободі колеса і свого стану (ступеня зарядженості) накопичувач або накопичує, або віддає енергію.

Далі проводиться оптимізація режимів роботи силової установки тепловоза по мінімуму витрати

палива, яка здійснюється в блоці вибору оптимальної потужності дизеля і режимів його роботи. Цей блок пов'язаний з блоком визначення витрати палива, в якому використані аналітичні залежності витрати палива від потужності і частоти обертання валу двигуна.

Методом, градієнта визначається оптимальний рівень заряду накопичувача перед відправленням поїзда на ділянку. В аналітичних моделях визначаються оптимальні значення потужності дизеля, необхідної для заряду накопичувача в режимах часткової тяги, на вибігу і при рекуперативному гальмуванні.

При моделюванні за експериментальними даними режимів роботи тепловоза вибирається робоча позиція контролера, що забезпечує мінімальну витрату палива протягом поїздки в порівнянні з іншими режимами з урахуванням можливості заряду накопичувача в режимі рекуперації.

Дослідження режимів роботи тепловозів з накопичувачами енергії на моделях дозволило визначити енергетичну ефективність рекуперативних силових установок і оцінити економічний ефект від їх впровадження.

Потяг є складною системою, що складається з багатьох частин, пружно і жорстко пов'язаних один з одним. Тому рух поїзда по рейковому шляху можна представити як вираз для його кінетичної енергії по теоремі Кеніга:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{J_\delta w_\delta^2}{2} + \sum \frac{J_n w_n^2}{2} + \sum \frac{J_\gamma w_\gamma^2}{2},$$

де A_k – кінетична енергія потяга;

m – маса потяга;

v – швидкість поїзда;

$J_\delta w_\delta$ – момент інерції і кутова швидкість

рушійної колісної пари при застосуванні диференціальної передачі з пов'язаними з ними елементами рушійного механізму;

J_n, w_n – момент інерції і кутова швидкість

підтримуючої колісної пари або коліс;

J_γ, w_γ – момент інерції і кутова швид-

кість якоря двигуна, включаючи частини передачі, укріплені на його валу.

Основним параметром є швидкість потяга та маса, також додається за допомогою суматора значення величини ухилу на ділянці, вихідні сигнали після цього перемножуються за допомогою блоку «produkt» з відповідними масами. У підсистемі формування профілю вхідною величиною є пройдений шлях.

В залежності від значення вхідної величини у вихідний суматор поступає те чи інше значення, яке

на виході з суматору дає значення ухилу на цій ділянці.

Ефективність управління транспортним дизель-генератором однозначно визначається ефективністю витрати палива.

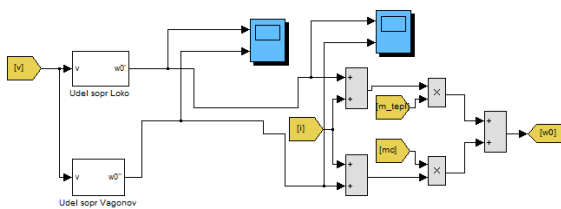


Рис. 2. Структура блока, що моделює рух потяга

Існує певний взаємозв'язок частоти дизеля, положення рейки паливних насосів і коефіцієнта надлишку повітря. Він може використовуватися як критерій для визначення, наприклад, такого темпу розгону системи, при якому спалювання палива призводить до вчинення корисної роботи, а не до обігріву атмосфери.

В основу моделі покладено наступна передумова - математична модель установки повинна бути максимально простою, оскільки по ній буде простежуватися зв'язок параметра всього з двома величинами: ходом рейки h і частотою дизеля n .

Інші особливості динамічних процесів для вирішення поставлених завдань визначального значення не мають. Тому зазори і малі інерційності слід виключити з розгляду. Таким чином, математична модель не повинна копіювати поведінку всіх конструктивних елементів, електромагнітні та теплові процеси, але повинна повторювати поведінку установки в фізичному експерименті.

Вихідне рівняння руху дизель-генератора прийнято у вигляді:

$$J_{\partial z} \frac{d\omega}{dt} = +M_{\partial} - M_n - M_c,$$

де $J_{\partial z}$ – приведений момент інерції обертових частин дизель-генератора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

ω_d – кутова швидкість обертання вала дизеля, рад/с;

M_{∂} – активний момент на валу дизеля, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

M_n – момент навантаження на валу дизеля, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

M_c – момент опору обертанню вала дизеля, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

На рис 3. представлена математична модель дизеля K6S310DR маневрового тепловоза ЧМЕЗ.

Існує декілька методик визначення витрат палива на роботу тепловоза. Скористуємось однією з них, згідно якої величина витрат палива E може бути визначена як

$$E = \sum_{j=1}^n G_{\text{дл}} \Delta t + \sum_{j=1}^m G_{\text{хл}} \Delta t.$$

де $G_{\text{дл}}$ – витрати палива за одиницю часу при роботі дизеля під навантаженням, кг/с;

$G_{\text{хл}}$ – витрати палива за одиницю часу при роботі дизеля на холостому ході.

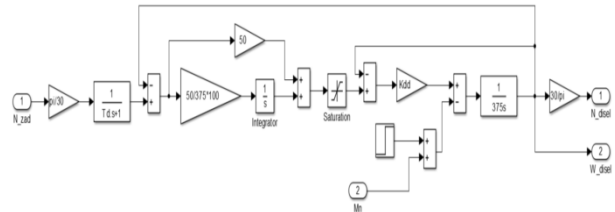


Рис. 3. Математична модель дизеля K6S310DR тепловоза ЧМЕЗ

В режимі тяги величина витрат палива $G_{\text{дл}}$ приймається відповідно до позиції $m_{\text{дл}}$, що використовується на j -му кроці.

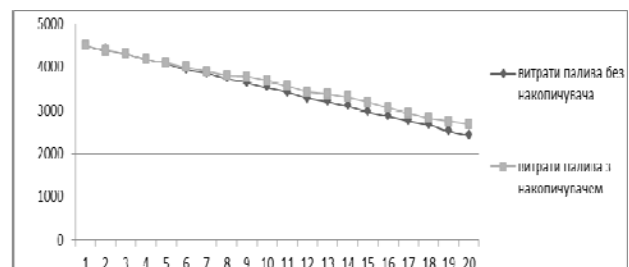


Рис. 4. Витрати палива з накопичувачем енергії та без

Висновок. Таким чином використання комбінованого накопичувача енергії у силовому ланцюгу маневрового локомотива дозволяє зменшити витрати палива на маневрову роботу.

Література

1. Краснянская С.Н. Исследование электрического тормоза с целью повышения экономичности и эксплуатационной надежности тепловозов: Автореферат дис. ... канд. техн. наук./ С.Н. Краснянская – М.:МИИТ, 1979. – 26 с.
2. Казанцев В.П. Выбор оптимальной мощности маневрового локомотива для работы на вытяжке в текущих эксплуатационных условиях и на перспективу [Текст]: дис. ... к. т. н. / В.П. Казанцев. – М., 1966. – 156с.
3. Гончаров Н.Е. Маневровая работа на железнодорожном транспорте [Текст] / Н.Е. Гончаров, В.П. Казанцев – М.: Транспорт, 1978. – 183 с.
4. Никипельый, С.О. Повышение эффективности работы тепловозов при применении накопителя энергии в силовой цепи [Текст]: дис. ... к. т. н.: спец. 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация / С.О. Никипельый. – М.: МГУПС, 2011. – 167 с.
5. Лосев, Е.П. Эффективность применения накопителей энергии в силовых установках автономных локомотивов [Текст] : дис. ... к. т. н. : спец. 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов / Е.П. Лосев. – М.: МГУПС, 2000. – 211с.

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. Liudvinavičius L. Lingaitis L. P. 2010. New locomotive energy management systems. / Maintenance and reliability = Eksploatacja i niezawodność / Polish Academy of Sciences Branch in Lublin. Warszawa. ISSN 1507-2711. No 1, 2010, p. 35-41
9. P. Barrade, Series connexion of Supercapacitors : comparative study of solutions for the active equalization of the voltage, École de Technologie Supérieure (ETS), Montréal, Canada, 2001
10. J. D. Boyes and H. H. Clark, Technologies for energy storage flywheels and super conducting magnetic energy storage, IEEE, 2000.

References

1. Krasnyanskaya S. N. Investigation of electric brakes with the aim of increasing efficiency and of exploitation of operational reliability of locomotives: author's abstract of dis. kand. tech. Sciences./ S. N. Krasnyanskaya, M.:engineering, 1979. – 26 S.
2. Kazantsev V. P. the Choice of optimum capacity shunting locomotive to work on the hood in ongoing operating conditions and future prospects [Text]: dis. ... Ph. D. / V. P. Kazantsev. – M.:1966. – 156s anchor.
3. Goncharov N. E. Shunting work on railway transport [Text] / N. E. Goncharov, V. P. Katanchev – M.: Transport, 1978. – 183 S.
4. Nicely S. O. Improving the efficiency of the locomotives in the application of energy storage in the power circuit [Text]: dis. ... Ph. D.: spec. 05.22.07 – dvojnjoj of Railways, traction of trains and electrification of the S. O. Nicely. – M.: Moscow state railway University, 2011. – 167 p
5. Losev E. P. Efficiency of use of energy storage in power plants of Autonomous Loco-motives [Text] : dis. ... Ph. D. : spec. 05.22.07 – dvojnjoj of Railways and deadlifts train / E. P. Lo-SEV. – M.: Moscow state railway University, 2000. – 211c.
6. Kossov, E. E. influence of the effectiveness of energy storage to fuel efficiency of locomotive E. E. Kossov, V. A. Azarenko, A. N. Kornev, M. Komarnicki // Locomotivity. – Kharkiv:Tekhnostandart. No. 3, 2008. – S. 44 – 45.
7. Golubenko A. Energy of diesel locomotive's electrodynamic braking for increase of efficiency of diesel locomotive engines / A. Golubenko, V. Mogila, Nozhenko H. // Coll. of scientific labours. - 2007. – Issue 69. – P. 147 – 153
8. Liudvinavičius L. Lingaitis L. P. 2010. New locomotive energy management systems. / Maintenance and reliability = Eksploatacja i niezawodność / Polish Academy of Sciences Branch in Lublin. Warszawa. ISSN 1507-2711. No 1, 2010, p. 35-41
9. P. Barrade, Series connexion of Supercapacitors: comparative study of solutions for the active equalization of

the voltage, École de Technologie Supérieure (ETS), Montréal, Canada, 2001

10. J. D. Boyes and H. H. Clark, Technologies for energy storage flywheels and super conducting magnetic energy storage, IEEE, 2000.

Яровой Р.А. Эффективность использования комбинированных накопителей электрической энергии на маневровых локомотивах.

В статье рассмотрены вопросы эффективности применения накопителей энергии на маневровых локомотивах типа ЧМЭЗ. Предложена имитационная модель маневрового локомотива ЧМЭЗ, с комбинированным накопителем энергии в силовой цепи, для расчета расхода топлива. Представлены основные расчетные блоки имитационной модели и взаимосвязи между ними. Имитационная модель состоит из шести блоков. В первом блоке просчитывается тяговая мощность локомотива на обод колесной пары. Второй блок служит для определения мощности двигателя, где учитываются потери в силовой передаче и потери мощности на вспомогательные нагрузки. Третий блок определения состояния накопителя. Блок сравнения служит для согласования энергетических параметров всех компонентов силовой установки локомотива. Далее проводится оптимизация режимов работы силовой установки тепловоза по минимуму расхода топлива, которая осуществляется в блоке выбора оптимальной мощности дизеля и режимов его работы. Этот блок связан с блоком определения расхода топлива, в котором использованы аналитические зависимости расхода топлива от мощности и частоты вращения вала. Полученная модель доказывает, что использование комбинированного накопителя энергии в силовой цепи маневрового локомотива позволяет уменьшить расход топлива на маневровую работу.

Ключевые слова: подвижной состав, электродинамическое торможение, накопления энергии, гибридный привод.

Yarovoy R. The effectiveness of combined storage of electrical energy on shunting locomotives.

The article considers the questions of efficiency of application of energy storage on shunting locomotives type CHME3. The proposed simulation model of shunting locomotive CHME3, with a combined energy storage in the power circuit, to calculate fuel consumption. Presents the main design blocks of the simulation model and the relationships between them. The simulation model consists of six blocks. In the first block is calculated tractive power of the locomotive on the rim of the wheel pair. The second block is used to determine engine power, which takes into account losses in the power transmission and power losses in the auxiliary load. The third unit determine the status of the drive. The compare unit is used to adapt the energy parameters of all components of the power plant of the locomotive. Next is the optimization of operation modes of the power plant of the locomotive at a minimum fuel consumption, which is carried out in the block selection of the optimal power diesel and modes of its work. This unit is associated with the block determining fuel consumption, which used the analytical dependence of fuel consumption from power and frequency of rotation of the shaft. The resulting model demonstrates that the combined use of

energy storage in the power circuit shunting locomotive allows to reduce fuel consumption on shunting work.

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

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

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 31.03.2017