

## АСПЕКТИ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ У ДИНАМІЦІ РУХУ ДВООСЬОВИХ ЕЛЕКТРОВІЗІВ

*В. В. Захаров, інж.*

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*

*вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна*

*E-mail: seem@kdu.edu.ua*

*І. О. Сінчук, к.т.н., доц.*

*Криворізький технічний університет*

*вул. XXII Партіз'їзду, 11, 50000, м. Кривий Ріг, Україна*

Сформовано умови зменшення витрат енергоресурсів при роботі електротранспорту в оптимальних динамічних режимах. Проведено аналіз ефективності режимів роботи електротранспорту, досліджено ступінь впливу режимів на енергозбереження. Проведені дослідження в області систем оптимального регулювання електротранспортом із вентиляним двигуном показали, що їх використання значно зменшує енергозатрати.

**Ключові слова:** енергозбереження, оптимальні динамічні режими роботи, економія енергоресурсів.

**Вступ.** На промислових підприємствах України експлуатується біля семи тисяч двовісєових електровізов. Тільки на підприємствах гірничовидобувної галузі щорічно біля 18–20 % від загальних обсягів споживаної електричної енергії витрачається цими електровізовами [1].

**Аналіз попередніх досліджень.** Існуючі типи вітчизняних двовісєових промислових електровізов обладнані енергоефективними контактнорезисторними системами керування тяговими електротехнічними комплексами (ТЕТК). Розробка та практичне втілення нових ефективних систем ТЕТК не може бути технічно реально очікуваним без аналізу та розробки засобів мінімізації та протидії складовим опорам руху електровізов.

**Мета роботи.** Оцінка ступенів впливу складових елементів опор руху двоосєових електровізов на рівень енергозатрат.

**Матеріал і результати дослідження.** Питання оцінки впливу сил опор на рух електровізов аналізувались та оцінювались рядом дослідників, у тому числі для двоосєових електровізов [2–4]. Між тим, поки що результати досліджень далекі від тих, які можна характеризувати такими що вирішені. З [4] відомо, що силами опор руху називаються зовнішні сили, прикладені до поїзда й спрямовані у бік, протилежний руху. Окремі із цих сил діють постійно й створюють основний опір руху. До цих сил належать, зокрема, сили тертя в підшипниках, удари в рейкових стиках, сили тертя між колесами й рейками, опір повітряного середовища.

Основний питомий опір руху локомотива позначається  $w_0'$ , а руху вагона  $w_0''$ . Основний опір руху локомотивів розглядається як опір переміщенню будь-якого візка, тому що виникає в екіпажній частині. У цьому випадку вважається, що зубчасті передачі від тягових електродвигунів до рушійних осей роз'єднані. Тому основний питомий опір локомотива  $w'$  часто називають питомим опором локомотива як візка.

Оскільки на локомотивах завжди є тягові електродвигуни, а також передавальний механізм від них до провідних осей, то з'являється додатковий опір від сил тертя в механічній передачі й від витрат елек-

троенергії в тягових електродвигунах. Цей додатковий опір називається опором локомотива як машини. У тягових розрахунках воно не враховується, тому що сила тяги на ободі колеса  $F_k$  визначається з обліком ККД локомотива.

Опір від тертя в буксових підшипниках виникає при обертанні шийки осі щодо корпусу букси. При цьому відбувається тертя катання роликів по бігових доріжках кілець, тертя між деталями підшипників і змащенням і внутрішнє тертя між шарами змащення. Теоретично розрахувати опір руху від підшипників досить складно, тому при тягових розрахунках використовуються експериментальні дані, одержувані в досвідчених поїздах.

Однією зі складових основного опор є опір від кочення коліс по рейках. При русі колеса воно жене по рейці пружну хвилю. Все це викликає відносні переміщення колеса й рейки, а також рейки, шпал і баласту, супроводжувані тертям, що створює опір руху.

Профіль поверхні кочення колеса має конусну форму, що призводить до проковзування коліс по рейках при коченні й до появи сил тертя, що викликають опір руху. Сили тертя між колесом і рейкою виникають також і при поперечному переміщенні колісних пар у рейковій колії, що відбувається постійно через вилання колісної пари.

Нааявність на шляху стиків між рейками також викликає появу опор руху. При коченні колеса по рейці поблизу стику кінець рейки, на якому перебуває колесо, прогинається. Колесо набігає на вільний кінець сусідньої рейки й ударає об нього, що збільшує опір. На поїзд, що рухається, робить також вплив навколишнє повітряне середовище. Воно викликає постійно діючий аеродинамічний опір руху. Розрахункові формули й графічні залежності для визначення основного питомого опор залежно від типу й конструктивних особливостей рухливого состава приводяться в Правилах тягових розрахунків (ПТР). Наприклад, для вантажних чотиривісєових вагонів з осєовим навантаженням  $q_n$  при швидкості руху  $v$  основний питомий опір дорівнює:

$$w'_0 = 0,7 + \frac{1}{q_n} (8 + 0,1v + 0,0025v^2).$$

На ділянках шляху, що мають підйом, виникає додатковий опір руху. Він викликається роботою складової сили ваги, спрямованої проти руху паралельно лінії підйому. На спуску ця складова опору не створює, а є прискорювальною силою. Величина додаткового питомого опору від підйому чисельно дорівнює величині підйому, вираженої в тисячних. Наприклад, при русі поїзда на підйом із крутістю 8 ‰ питомий опір від підйому буде  $W_i$  — 8 кГс/тс. На ухилі  $W_i$  приймається зі знаком мінус.

При русі в кривих ділянках шляху з'являється додатковий опір  $W_r$ , викликаний тертям у ходових частинах рухливого состава, а також тертям бандажа й гребеня колеса об рейку. Цей опір визначається за емпіричною формулою

$$W_r = \frac{700}{R},$$

де  $R$  — радіус кривої в м.

При тягових розрахунках швидкісних поїздів необхідно враховувати додатковий опір руху від гальмових дисків:

$$w''_0 = K_v v.$$

Повний опір руху поїзда на підйомі в кривій ділянці шляху в загальному випадку складається з опору локомотива й опору вагонів:

$$W_K = (w'_0 + w_r + w_i)P + (w''_0 + w_r + w_i)G;$$

$$W_K = w'_0 P + w''_0 G + (w_r + w_i)(P + G).$$

Повний питомий опір поїзда буде дорівнює:

$$w_K = \frac{W_K}{P + G} = \frac{(w'_0 + w_r + w_i)P + (w''_0 + w_r + w_i)G}{P + G}.$$

У відносних одиницях питомий опір поїзда буде дорівнювати:

$$w_K = f_0 + f_1 v + f_2 v^2,$$

де  $f_0$  — опір поїзда, який залежить від підйому та радіусу кривої рейки;  $f_1$  — коефіцієнт опору поїзда по швидкості;  $f_2$  — коефіцієнт опору поїзда по квадрату швидкості.

З урахуванням результатів моделювання замкнутої САР ЕП ВД із ППД-регулятором швидкості та ПП-регулятором струму ТЕП приймаємо як пропорційну ланку. Тоді сила тяги буде пропорційна силі струму ВД електропоїзду.

Розв'яжемо задачу оптимального керування методом функцій Лагранжа.

Система рівнянь збуреного руху поїзда у відхиленнях:

$$\frac{dv}{dt} = a;$$

$$\frac{da}{dt} = f_U - f_0 - f_1 v - f_2 v^2,$$

де  $f_U$  — сила тяги потягу електровозу.

Треба знайти такі траєкторії руху, для яких функціонал

$$I = \int_0^t (\alpha f_{opt}^2 + \beta v^2) dt \Rightarrow \min,$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  — вігові коефіцієнти, які враховують мінімальні збитки електроенергії та відхилення від бажаної траєкторії швидкості руху;  $f_{opt}$  — оптимальна сила тяги.

Значення інтеграла не зміниться при введенні допоміжних невизначених функцій Лагранжа:

$$I = \int_0^t \left[ \left( \alpha f_{nom}^2 + \beta v^2 \right) + \lambda_1 \left( \frac{dv}{dt} - a \right) + \lambda_2 \left( \frac{da}{dt} - \left( -f_{opt} + f_0 + f_1 v + f_2 v^2 \right) \right) \right] dt = \int_0^t L dt \Rightarrow \min.$$

Система рівнянь, яка описує оптимальну траєкторію руху за мінімумом енерговитрат із невизначеними функціями Лагранжа, може бути здобута за допомогою рівнянь:

$$\frac{\partial L}{\partial f_{opt}} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \frac{df_{opt}}{dt}} \right) = 2\alpha f_{opt} - \lambda_2 = 0;$$

$$\frac{\partial L}{\partial a} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \frac{da}{dt}} \right) = -\lambda_1 + \frac{d\lambda_2}{dt} = 0;$$

$$\frac{\partial L}{\partial v} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \frac{dv}{dt}} \right) = 2\beta v + f_1 \lambda_1 + 2f_2 v \lambda_2 - \frac{d\lambda_2}{dt} = 0.$$

Оптимальний закон керування силою тяги дорівнює:

$$f_{opt} = \frac{\lambda_2}{2\alpha}.$$

Розширена оптимальна система збуреного руху у відхиленнях:

$$\frac{dv}{dt} = a;$$

$$\frac{da}{dt} = \frac{\lambda_2}{2\alpha} - f_0 - f_1 v - f_2 v^2;$$

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = (f_1 + 2f_2 v)\lambda_2 + 2\beta v.$$

Графіки перехідних процесів — траєкторії руху для систем з початковими умовами  $v(0) = v_0$ ;  $a(0) = 0$ ;  $\lambda_2(0) = 0$  та різних значеннях  $f_0$  — опору поїзда, приведені на рис. 1–4.

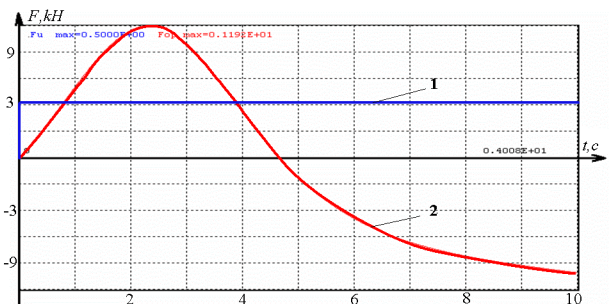


Рисунок 1 — Стала (1) та оптимальна (2) сили тяги,  $f_0 = 0,2$

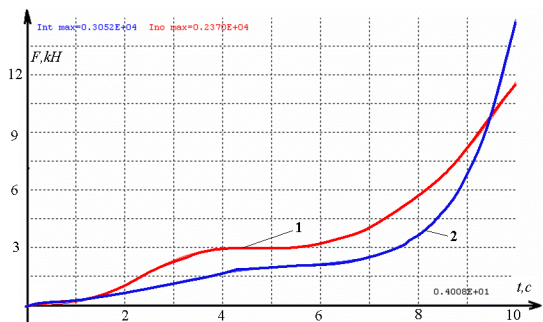


Рисунок 2 – Значення інтегралів для сталої (1) та оптимальної (2) сили тяги,  $f_0 = 0,2$ .

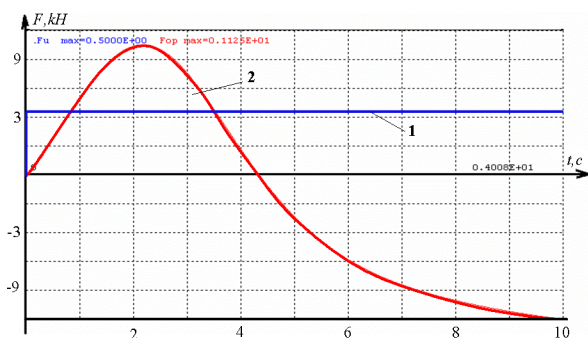


Рисунок 3 – Стала (1) та оптимальна (2) сили тяги,  $f_0 = 0,4$

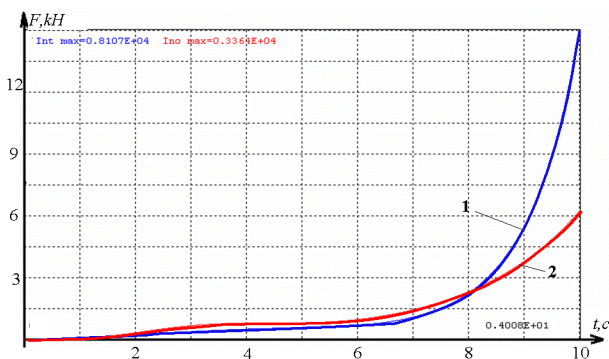


Рисунок 4 – Значення інтегралів при сталій та оптимальній силі тяги,  $f_0 = 0,4$

**Висновки.** Застосування оптимального керування електровозом згідно запропонованих умов дозволяють зменшити на 10 % час руху составу. При цьому непродуктивні енергетичні втрати в ланцюзі тягових двигунів зменшуються на 33 %.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышев и др.; под ред. О.Н. Синчука. – К., 2006. – 178 с.
2. Медель В.В. Взаимодействие электровоза и пути. – М.: Транселдориздат, 1956. – 158 с.
3. Минов Д.К. Теория процесса реализации сил сцепления при электрической тяге и способы повышения их использования // Сб. "Проблема повышения эффективности работы транспорта. АН СССР". – 1963. – № 1. – С. 21–25.
4. Поляков Н.С., Билан Н.Е. Экспериментальное исследование сопротивления движению одиночных шахтных вагонеток и электровозов // Сб. Вопросы рудничного транспорта: Госгортехиздат, 1965. – № 3. – С. 18–24.
5. Понтрягин Л.С, Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
6. Мокін Б.І. Оптимізація електроприводів: Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ. – Вінниця, 2004. – 250 с.

Стаття надійшла 25.02.11 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Сінчуком О.М.

## АСПЕКТЫ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ДИНАМИКЕ ДВИЖЕНИЯ ДВУХОСНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

*В. В. Захаров, инж.*

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина*

*E-mail: seem@kdu.edu.ua*

*И. О. Синчук, к.т.н., доц.*

*Криворожский технический университет*

*ул. XXII Партсъезда, 11, 50000, г. Кривой Рог, Украина*

Сформированы условия уменьшения затрат энергоресурсов при работе электротранспорта в оптимальных динамических режимах. Проведен анализ эффективности работы электротранспорта, исследована степень влияния режимов на энергосбережение. Проведенные исследования в области систем оптимального регулирования электротранспортом с вентильным двигателем показали, что их использование значительно уменьшает энергозатраты.

**Ключевые слова:** энергосбережение, оптимальные динамические режимы работы, экономия энергоресурсов.

## ASPECTS OF POTENTIAL OF ENERGoeffektivnosti OF HAULING ELECTRICAL ENGINEERINGS COMPLEXES ARE IN DYNAMICS OF MOTION OF BIAxIAL ELECTRIC LOCOMOTIVES

*V. Zaharov, eng.*

*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*

*vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine*

*E-mail: seem@kdu.edu.ua*

*I. Sinchuk, Cand. Sc. Eng., Assoc. Prof.*

*Kryvyi Rih Technical University*

*vul. XXII Partyzivdy, 11, 50000, Kryvyi Rih, Ukraine*

Conditions of reduction of expenses of power resources are generated at job of electrotransport in optimum dynamic modes. The analysis of an overall performance of electrotransport is lead, the degree of influence of modes on the power savings is investigated. The lead researches in the field of systems of optimum regulation by electrotransport with gate the engine have shown, that their use considerably reduces power expenses.

**Key words:** energy-savings, optimum dynamic modes of the work, economy of energoresursov.