

Диаметр ролика с учетом кольца (рис. 1)

$$D_p = 0,33 \cdot d + 0,01 \cdot D$$

С учетом, что толщина подкладного кольца 2 равна  $\bar{C}(\omega_n)Z = 0$ , радиус поверхности катания роликов составит

$$R = \frac{D}{2} - h.$$

Для определения сопротивления качению кольца подшипника 1 по подкладному кольцу 2 найдем величину деформации гибкого колеса, воспользовавшись табличными данными отношений  $\frac{\omega}{\omega_0}$ , приведенными в [3].

Воспользовавшись параболическим выравниванием, получим

$$\omega = -1,04 \cdot \varphi^2 - 0,0053 \cdot \varphi + 0,616. \quad (3)$$

Радиус кривизны кольца в месте контакта [4]

$$\rho = \frac{d}{2} + \frac{\sqrt{(p+2 \cdot x)^3}}{\sqrt{p}}, \quad (4)$$

где  $p$  — параметр параболы,  $x$  — ордината линии касания.

При известной величине  $\omega_0$  (2) сила прижатия ролика к гибкому кольцу [4]

$$p = \frac{\omega_0 \cdot E \cdot I}{R^3 \cos\{[(\pi - \beta) - 2 \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta - \beta] + 0,6366[(\pi - \beta) \sin \beta - 2 \cdot \cos \beta - \beta \cdot \sin \beta]\}} \quad (5)$$

При известных величинах  $D_p$  и  $\rho$  и линейном контакте коэффициент трения качения [2]

$$k = 0,225 \cdot b \cdot e^{-0,6 D_p}, \quad (6)$$

где  $b = 1,522 \cdot \sqrt{\frac{D_p}{b_1 \cdot E} \cdot \frac{\rho}{\rho - \frac{D_p}{2}}}$  — полуширина пятна контакта,

та,  $b_1 = 10m$  — ширина подкладного кольца.

Сопротивление качению (при  $M_2 = 1$  МНм,  $m = 1$  мм,  $\beta = 25^\circ$ ,  $[\sigma_{CM}] = 8$  МПа,  $\psi_d = 0,15$ ,  $E = 1,2 \times 10^5$  МПа,  $z_c = 202$ ,  $n_n = 1400$  об/мин,  $x_F = 3$ ) четырех роликов составляет десятки доли Ньютона, что говорит о том, что сопротивление качению роликов по гибкому колесу практически не влияет на к.п.д. волновых передач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tabor D. The mechanism of rolling friction: the elastic range, — Proc. Roy. Soc., 1955. — p. 198.
2. Бондаренко Л.М. Аналітично — експериментальне визначення коефіцієнта тертя кочення// Будівництво України. — № 5. — 2001. — С. 47 — 48.
3. Иванов М.Н. Детали машин. — М.: Высшая школа, 1975. — 551 с.
4. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. — Киев: Наук. Думка, 1988. — 736 с.

УДК 629.4.072

Я.В. Щербак, д-р техн. наук, В.П. Нерубацький, аспірант (УкрДАЗТ)

## Вибір раціональних режимів ведення поїздів з метою зниження витрат електроенергії на тягу

Ключові слова: енергозбереження, раціональні режими ведення, методи оптимізації, енергооптимальні траєкторії руху.

**Постановка проблеми.** В сучасних ринкових умовах все більшої актуальності набувають питання підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту і ефективності його роботи, доставка вантажів точно в строк і зниження витрат на перевезення, привабливість їх для вантажовідправників. Вирішення вказаних завдань вимагає принципово нових підходів до організації перевізного процесу і освоєння нових технологій водіння вантажних, пасажирських і приміських поїздів.

© Я.В. Щербак, В.П. Нерубацький, 2011.

**Актуальність досліджень.** Частка вартості енергоносіїв в собівартості перевезень Укрзалізниці на сьогодні складає 18,2 %, при цьому по електроенергії — 8,1 %, по дизпаливу — 9,4 %, по газу — 0,3 %. Тобто майже 1/5 всіх витрат залізниці доводиться на паливно-енергетичну складову. Саме тому в зменшенні споживання цих енергоносіїв криється значний потенціал для оптимізації і підвищення економічної ефективності функціонування УЗ. Основна доля витрат палива та електроенергії припадає на тягу поїздів. Приміром, за 2010 р. це 87,9 % від загальних витрат дизельного палива, та 84,2 % — електроенергії [1]. Тому велику увагу слід приділяти скороченню та оптимізації витрат саме та тягу поїздів.

На сьогодні залізниця — найбільш економічний вид транспорту. Серед всіх видів транспорту вона має мінімальні значення питомої витрати паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виробленої роботи. Не дивлячись на існуючу низьку питому енергоємність залізничного транспорту, потенціал економії експлуатаційних витрат за рахунок скорочення витрати палива і енергії в галузі і сьогодні вельми істотний, а можливість активно впливати на нього за допомогою технологічних і технічних новацій дуже велика. У заходах щодо енергозбереження криється значний потенціал підвищення експлуатаційної ефективності функціонування залізниць. З урахуванням прогнозованого зростання цін на енергоресурси робота в цих напрямках стає ще актуальнішою. Рівень витрат паливно-енергетичних ресурсів в локомотивному господарстві залежить від економічності тягового рухомого складу, ефективності його використання та, в значній мірі, відповідності вибраного режиму ведення

поїздів раціональному. У зв'язку з цим завдання розробки методик оперативного розрахунку раціональних режимів ведення поїзда з урахуванням його характеристик і реальних умов експлуатації є нагально важливим.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробці методів визначення оптимальних режимів ведення передували значні фундаментальні дослідження задач тяги поїздів, в основу яких були пок-ладені роботи Б.Д. Воскресенського, П.Т. Гре-бе-ню-ка, П.А. Гурського, Є.Ф. Єгорченка, І.П. Ісаєва, Б.М. Максимовича, О.П. Новикова, В.Е. Розенфельда, М.М. Сидорова, Д.А. Штанге та інших.

Питанню застосування сучасного математичного апарату, методів оптимізації з використанням ЕОМ для розрахунку раціональних режимів ведення поїздів, а також питання визначення оптимального за критерієм витрати електроенергії перегінного часу ходу поїзда по дільниці присвячені роботи [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19].

**Мета статті.** Дослідити зниження витрат електроенергії на тягу поїздів за рахунок застосування бортового комп'ютера та вибору раціональних режимів ведення поїздів при заданому часу ходу поїзда по дільниці та впливу швидкісних обмежень.

**Основна частина.** Сучасні тенденції і практика розвитку локомотиво- та електровозобудування направлені на автоматизацію керування рухом поїздів. Достатньо широкого поширення набуло використання у вантажному і пасажирському руху систем «автомашиністів». В цьому випадку максимальний ефект досягається при використанні енергооптимальних програм в бортових системах автоведення, коли розрахунок і реалізація енергооптимальних траєкторій здійснюється в реальному часі залежно від постійно змінної поїзної обстановки з урахуванням постійних і тимчасових обмежень швидкості, сигналів світлофорів, умов проїзду кожної конкретної ділянки, а також безлічі інших чинників.

Існуючі на сьогодні алгоритми керування поїздом передбачають розрахунок програм ведення поїзда безпосередньо на локомотиві, тобто в реальному часі. Очевидно, що апаратна реалізація таких алгоритмів можлива лише при використанні таких засобів обчислювальної техніки, як мікропроцесори та мікро-ЕОМ. За наявності комп'ютерів машиністи отримують можливість вести поїзди строго за графіком і одночасно забезпечувати мінімальну витрату електроенергії, використовуючи резерви часу, передбачені графіком руху, якщо ці резерви не були вичерпані унаслідок збоїв. Оптимізація ведення навіть, за наявності численних обмежуючих умов (топология ділянки шляху, втрати енергії в тягових агрегатах і допоміжному устаткуванні тощо), дозволяє знизити споживання електроенергії більш ніж на 10 %, що вельми істотно.

Для практичної реалізації такої оптимізації і отримання значущого ефекту необхідне широке застосування на мережі залізниць України енергооптимальних режимів керування рухом поїздів.

Аналіз інформаційних джерел, опублікованих у нашій країні та за кордоном, показав, що резерви економії енергоресурсів на тягу поїздів ще не вичерпані, а

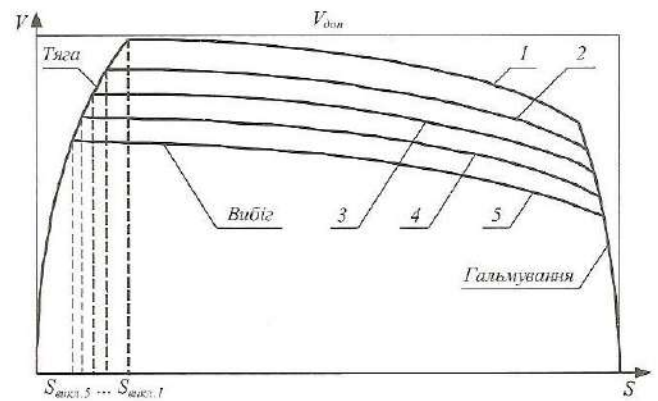


Рис. 1. Траєкторії руху поїзда для різних часів ходу.

використання раціональних режимів ведення поїздів є основним фактором зниження їхньої витрати. Найшвидше, але з найбільшою витратою електроенергії, можна провести поїзд по дільниці, застосовуючи наступні режими (рис. 1, траєкторія руху 1):

розгін і рух при максимальній силі тяги до досягнення максимальної допустимої швидкості;

тривалий рух з максимальною допустимою швидкістю; гальмування з максимальною допустимою гальмівною силою, що починається в найостанніший момент.

При моделюванні руху поїзд вважається як матеріальна точка з масою, зосередженою в центрі поїзда.

Це так званий енергосмний режим ведення поїзда. Інші режими (рис. 1, траєкторії руху 2, 3, 4, 5) вимагають більшого часу на проходження ділянки і, отже, більших його резервів. Досягнення заданого часу ходу поїзда по перегону досягається вибором координати виключення тягових двигунів електровоза  $S_{виск1}, S_{виск2}, S_{виск3}, S_{виск4}, S_{виск5}$ .

Знизити витрати енергії на тягу поїзда можливо наступними діями:

зменшенням сили тяги, а значить, зниженням прискорення при розгоні, так і швидкості руху;

періодичним повним відключенням тяги, що припускає використання кінетичної енергії при русі в гористій місцевості і перехід в режим вибігу перед гальмуванням; зниженням гальмівної сили;

застосуванням рекуперативного гальмування.

Економія енергії при будь-якому режимі ведення поїзда залежить від наявних резервів часу. Якщо резерви часу неприпустимо малі, завжди можна перейти на енергоємний режим ведення. Зрозуміло, економія енергії зростає зі збільшенням резервів часу, причому можливості вказаних режимів різні. При малих резервах часу застосування вибігу перед гальмуванням забезпечує значну економію енергії. Проте, по мірі зростання резервів часу збільшується економія, яку дає зниження максимальної швидкості. Найбільша економія енергії забезпечується умілим комбінуванням різних режимів ведення на підставі рекомендацій бортового комп'ютера.

Для розрахунку оптимального режиму ведення бортового комп'ютер повинен мати в своєму розпорядженні наступну інформацію:

регламентована швидкість руху поїзду, опір руху на підйомах, в кривих і в тунелях;

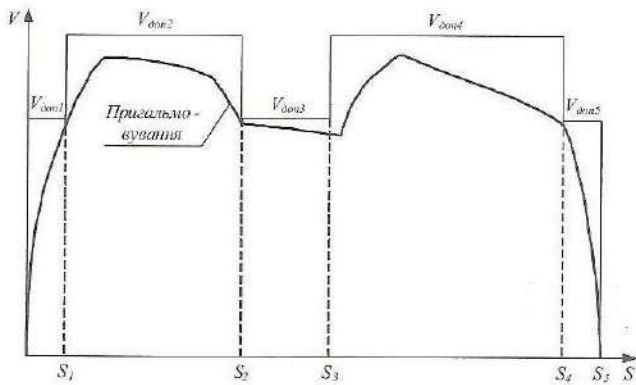


Рис. 2. Допустимі швидкості руху на перегоні.

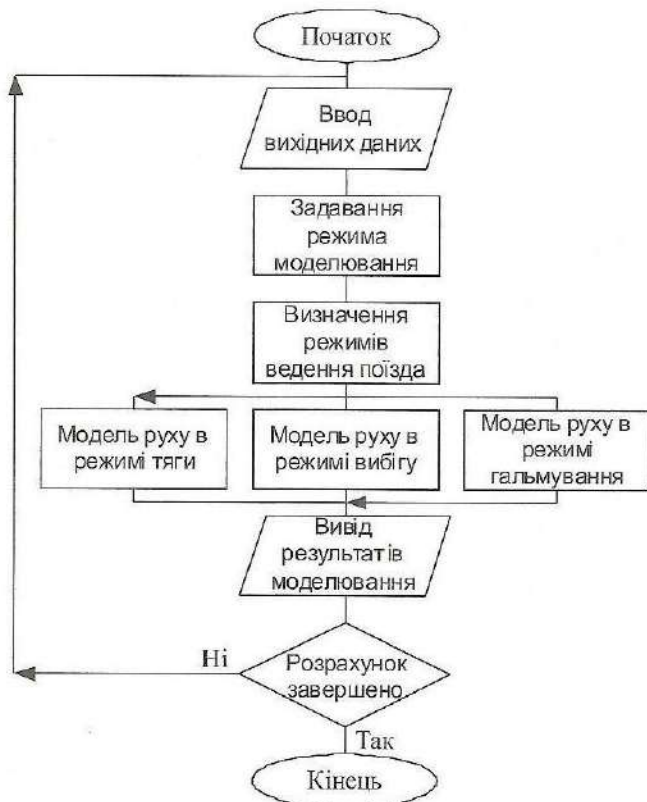


Рис. 3. Модульна блок-схема алгоритму моделювання руху поїзда.

використовувані величини сил тяги і гальмування, допустимі прискорення і уповільнення, втрати енергії в електроустаткуванні;

маса поїзда, повний опір руху.

Окрім гальмування для зупинки поїзда на станціях, на деяких перегонках застосовується гальмування для зниження швидкості перед обмеженнями швидкості. На рис. 2 представлена картина допустимих швидкостей на перегоні, де  $V_{доп1} - V_{доп5}$  — рівні допустимих швидкостей,  $S_1 - S_5$  — координати зміни рівнів допустимих швидкостей. Для зниження швидкості поїзда до  $V_{доп3}$  застосовується пригальмування.

До методики і засобів розрахунку оптимальних режимів руху поїзда надаються наступні вимоги:

облік всіх існуючих режимів ведення поїзда, можливість аналізу їх довільних комбінацій, висока швидкість обчислень;

надійність обчислювальної техніки, оптимальні умови взаємодії людини і машини, можливість пошуку якнайкращого компромісного рішення в межах, що визначаються ризиком запізнення і очікуваної величиною економії енергії.

На рис. 3 в якості прикладу представлена спрощена модульна блок-схема алгоритму моделювання руху поїзда, яка може лягти в основу оптимізаційної програми руху поїзда для бортового комп'ютера будь-якого електро-рухомого складу (електровози, електропоїзди, поїзди метрополітену).

Проблема енергозбереження залізниць — це комплексна проблема, тому окрім застосування бортового комп'ютера та вибору раціональних режимів ведення поїздів, зниження енергоємності залізничного транспорту України повинно полягати в проведенні корінної модернізації діючого парку. Наприклад, в удосконаленні електровозів шляхом введення регулювання швидкості обертання вентиляторів охолодження електричних двигунів у залежності від реалізованої ними сили тяги; оснащення тепловозів новими, менш затратними дизелями тощо.

Не слід забувати про такий важливий напрямок енергозбереження на залізницях, як рекуперация електроенергії, при застосуванні якої електроенергія повертається в контактну мережу [20]. Так, у 2010 році на залізницях України було повернуто у електромережу 93 млн. кВт·год електроенергії, що на 8,6 % більше результатів 2009 року [1].

При використанні математичних методів оптимізації керування рухом поїздів потрібна розробка і вдосконалення алгоритмів їх вирішення, повна автоматизація розрахунків у режимах реального часу, розробка спеціальних програм для ЕОМ. Розрахункові траєкторії руху поїзда повинні бути експериментально перевірені у реальних поїздах, як в частині можливості їх реалізації машиністами, так і в досягненні декларованої економії енергії. Результати енергооптимальних розрахунків можуть безпосередньо вводитися у системи автоматичного керування локомотивом чи електропоїздом або використовуватися машиністами у вигляді енергооптимальних траєкторій, приведених на режимних картах, що враховують особливості ділянок обертання поїздів, характеристики поїзда, а також умови пропуску поїздопотоків.

**Висновки.** Одним з механізмів вирішення задачі економії енерговитрат на тягу поїздів є використання оптимальних режимів керування локомотивами і моторвагонним рухомим складом. Для формування раціонального режиму ведення поїзда по дільниці, за мінімумом витрат енергоресурсів та заданому часі руху, запропонований достатньо швидкодіючий алгоритм побудови енергетично оптимальної траєкторії руху, придатний для керування рухом поїзда за допомогою бортового комп'ютера. Крім того, завдяки модульному принципу побудови системи досить просто адаптувати її до різноманітного рухомого складу, у тому числі і до поїздів на електричній тязі. Можливість гнучко оперувати резервами часу дозволяє при їх русі економити електроенергію і забезпечувати при цьому високу точність дотримання графіка руху.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астрахан В.И. Алгоритмы управления движением поездов метрополитена по перегонам [Текст] / В.И. Астрахан, В.М. Маликов, Е.Г. Фаминская // Труды ВНИИЖТа — М.: Транспорт, 1981. — № 6. — С. 19—22.
2. Баранов Л.А. Исследование процесса регулирования времени хода в системе автоматического ведения поезда на базе микроЭВМ [Текст] / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, И.А. Аснис // Труды МИИТа. — 1982. — Вып. 710. — С. 49—55.
3. Баранов Л.А. Расчет экономичных режимов управления поездом в микропроцессорных системах автоведения [Текст] / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Г.П. Эпштейн // Труды ВНИИЖТа — М.: Транспорт, 1987. — №6. — С. 12—17.
4. Головичер Я.М. Энергетически оптимальный алгоритм управления для системы автоведения поезда [Текст] / Я.М. Головичер // Труды ВНИИЖТа — М.: Транспорт, 1982. — №8. — С. 18—22.
5. Головичер Я.М. Аналитический метод расчёта оптимального управления движением поезда [Текст] / Я.М. Головичер // Электромеханика. — 1985. — №3. — С. 58—66.
6. Дувалян С.В. Построение оптимальной кривой движения поезда [Текст] / С.В. Дувалян // Труды ВНИИЖТа — М.: Транспорт, 1968. — №1. — С. 57—60.
7. Ерофеев Е.В. Определение оптимального по расходу электроэнергии перегонного времени хода поезда метрополитена [Текст] / Е.В. Ерофеев // Труды ВНИИЖТа — М.: Транспорт, 1979. — №2. — С. 56—57.
8. Ерофеев Е.В. Определение оптимальных по расходу электроэнергии программ движения пассажирских поездов с электровозами, оборудованными регуляторами скорости [Текст] / Е.В. Ерофеев // Труды МИИТа. — 1982. — Вып. 710. — С. 74—80.
9. Климович А.В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу [Текст]: Монография / А.В. Климович. — М.: Компания Спутник+, 2008. — 263 с.

10. Костромин А.М. Об интегрировании уравнений движения поезда и расчёте оптимальной траектории [Текст] / А.М. Костромин // Труды БелИИЖТа. — 1974. — Вып. 132. — С. 3—12.

11. Максимов В.М. Оптимальные тяговые расчёты при заданном времени хода поезда по участку [Текст] / В.М. Максимов // Труды МИИТа. — 1967. — Вып. 253. — С. 91—98.

12. Максимов В.М. Выбор рациональных режимов ведения поезда [Текст] / В.М. Максимов // Железнодорожный транспорт. — 1968. — №3. — С. 55—57.

13. Максимов В.М. Оптимальное определение времени хода поезда по перегонам [Текст] / В.М. Максимов // Труды МИИТа. — 1975. — Вып. 498. — С. 48—52.

14. Мугинштейн Л.А. Энергооптимальный тяговый расчёт движения поездов [Текст] / Л.А. Мугинштейн, С.А. Виноградов, И.А. Ябло // Железнодорожный транспорт. — № 2. — 2010. — С. 24—29.

15. Петров Ю.П. Оптимальное управление движением транспортных средств [Текст] / Ю.П. Петров. — Л.: Энергия, 1969. — 96 с.

16. Почаевец Э.С. Исследование оптимального тягового режима электроподвижного состава [Текст] / Э.С. Почаевец // Труды МИИТа. — 1967. — Вып. 282. — С. 82—92.

17. Сидельников В.М. Выбор оптимального режима управления локомотивом с использованием ЭЦВМ [Текст] / В.М. Сидельников // Труды ВНИИЖТа — М.: Транспорт, 1965. — №2. — С. 52—58.

18. Феоктистов В.П., Шапкин И.Н. Автоматическое регулирование скорости электроподвижного состава [Текст] / В.П. Феоктистов, И.Н. Шапкин // Железнодорожный транспорт. — № 3. — 1968. — С. 86—91.

19. Щербак Я.В. Анализ застосування рекуперативного гальмування на залізницях України [Текст] / Я.В. Щербак, В.П. Нерубацький // Залізнич. транспорт України. — 2011. — №2. — С. 30—34.

Уважаемые читатели и автор статьи «О закономерности изменения служебных свойств рельсов Донецкая железная дорога» А. М. Крутиков. Мы приносим свои извинения, в № 4 была допущена ошибка — напечатано две таблицы под № 2. Приносим свои извинения.

С уважением редакция журнала.

Таблица 3

План пути	Ресурсы показатели безотказности млн.т.бр.								
	НКМК			«Азовсталь»			НТМК		
	мин.	ср.	мак.	мин.	ср.	мак.	мин.	ср.	мак.
Прямая	162	254	346	150	250	350	138	246	354
	300	392	484	300	400	500	300	408	516
R ≥1000.0м	162	243	323	150	238	325	138	232	327
	300	381	461	300	388	475	300	394	489
R 900.0м	162	231	300	150	225	300	138	219	300
	300	369	438	300	375	450	300	381	462
R 800.0м	162	220	277	150	212	275	138	206	273
	300	358	415	300	362	425	300	368	435
R 700.0м	162	208	254	150	200	250	138	192	246
	300	346	392	300	350	400	300	354	408
R 600.0м	162	197	231	150	187	225	138	179	219
	300	335	369	300	337	375	300	341	381
R 500.0м	162	185	208	150	175	200	138	165	192
	300	323	346	300	325	350	300	327	354
R 400.0м	162	174	185	150	163	175	138	151	165
	300	312	323	300	313	325	300	313	327
R 300.0м	162	162	162	150	150	150	138	138	138
	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Прим.: числит. -нестермупрочненные, знаменат. -термупрочненные.