

neering. Vol. 3. № 4. 2009. 306–311. Print. **28.** McCrady, J. P., et al. "Computational Analysis of Biodiesel Combustion in a Low-Temperature Combustion Engine using Well-Defined Fuel Properties." Ser.: *SAE Techn. Pap.* No. 2007-01-0617. 2007. 1–12. Print. **29.** Levterov, A. M., and L. I. Levterova. "Chislennoe modelirovanie rabocheho cikla dizelja s neposredstvennym vpryskom. Prognozirovanie emissii sazhi i oksidov azota." *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser.: *Matematychni modeljuvannja v tehnici ta tehnologijah*. No. 5 (979). Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 141–154. Print.

Поступила (received) 11.05.2015

УДК 629.429.3:621.313

Б.Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

РАЦІОНАЛЬНІ ШВИДКІСНІ РЕЖИМИ РУХУ ПРИМІСЬКОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДУ З АСИНХРОННИМИ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ

На поточний момент при розробці та експлуатації нових типів електропоїздів виникає питання щодо визначення їх раціональних швидкісних режимів руху. В роботі розглядається методика, що дозволяє визначити раціональну максимальну швидкість руху електропоїзду на підставі комплексного критерію ефективності. Зазначається, що для розглянутого в роботі приміського електропоїзду з тяговим електроприводом на основі асинхронного тягового двигуна збільшення максимальної швидкості руху приводить не тільки до збільшення середньої швидкості руху електропоїзда, але і до зменшення витрати енергії на 3,75%, що обумовлене роботою приводу в режимі з великим значенням ККД.

Ключові слова: електропоїзд, асинхронний тяговий електропривод, максимальна швидкість руху, оптимальні режими роботи тягового приводу, комплексний критерій ефективності.

Вступ. Серцем електрорухомого складу є *тяговий електропривод* – сукупність пристроїв, призначених для перетворення електричної енергії, яка одержується з контактної мережі, в корисну роботу з переміщення електрорухомого складу. Його ефективність визначає більшою мірою ефективність всього електропоїзда.

Аналіз останніх досліджень. У роботах [1, 2] зазначається, що визначальним для режимів роботи та структури тягового електроприводу є тяговий двигун. Сучасний електрорухомий склад залізниць створюється в основному на основі асинхронного тягового приводу [1, 2]. Підвищена надійність і зниження витрат на експлуатацію, наявність стандартних технічних рішень в області напівпровідникової перетворювальної техніки привело до широкого використання приводу цього типу [1 – 4]. Застосування електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом потребує нових підходів до визначення раціональних швидкісних режимів руху порівняно з традиційними підходами, що застосовувались для електрорухомого складу з тяговими двигунами постійного струму. Як зазначено в [4, 5] керування роботою тягового приводу потрібно проводити на підставі мінімуму втрат [6 – 8], а швидкісний режим руху обирати по комплексному критерію ефективності [4].

Мета роботи. Розробити методику визначення раціональної максимальної швидкості руху приміського електропоїзду з асинхронними тяговими

© Б. Г. Любарський, 2015

двигунами.

Порядок та результати оптимізації швидкості руху електропоїзду. Ефективність тягового приводу в певному режимі його роботи оцінюватимемо по критерію максимуму його ККД за умови дотримання вимог, що накладаються режимами роботи. Тому задача визначення ефективності тягового приводу зводиться до знаходження екстремуму функції:

$$\max \eta = f \left(\begin{matrix} M_{зад} \\ n_{зад} \\ t_{зад} \end{matrix} \right)_{\text{var}[D]}, \quad (1)$$

де η – ККД приводу; M – момент на валу двигуна; n – частота обертання валу двигуна; $M_{зад}$, $n_{зад}$, $t_{зад}$ – заданий момент на валу, частота обертання ротора і температура двигуна (координати вектора режиму роботи тягового приводу); $[D]$ – вектор параметрів управління.

Втрати в тяговому перетворювачі залежать як від вектора режиму роботи тягового приводу, так і від параметрів управління (*коефіцієнта модуляції, ковзання*), тому для кожного електропоїзду в залежності від типу тягового двигуна необхідно вирішити задачу аналізу визначення оптимального режиму роботи на основі підходів, запропонованих в [3].

Так, наприклад, для тягового приводу на базі двигуна АД 917 оптимальні значення ККД наведені на рис. 1 та 2 для режимів просторово-векторної та однократної широтно-імпульсної модуляції.

Рівняння руху потягу має вигляд:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{1 + \gamma} (F - W - B), \quad (2)$$

де m – маса потягу; v – швидкість руху; $1 + \gamma$ – коефіцієнт інерції частин, що обертаються; t – поточне значення часу; F – сила тяги; B – гальмівна сила; W – повний опір руху; γ – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив частин, що обертаються, на прискорення руху електропоїзда.

Сили тяги і гальмування залежать від режиму роботи тягового приводу. На реально існуючих ділянках колії мінімізація витрати енергії є складним багатокритеріальним завданням. Для задачі, що розглядається, пропонується мінімізація часу руху на ділянці шляху з заданим профілем і графіком руху при наступних режимах руху електропоїзду:

- рух з максимальною допустимою силою тяги, яка здійснюється для розгону;
- рух на вибігу при швидкості, близькій до заданої;
- рух з максимальною силою гальмування при вимозі різкого зниження швидкості руху зважаючи на обмеження швидкості руху згідно з графіком руху;
- рух при роботі електропривода з максимальним ККД в режимі тяги при русі зі швидкостями близькими до заданої швидкості руху при великих опорах руху (на зтяжних підйомах);
- рух при роботі електропривода з максимальним ККД в режимі гальмування, тобто зі швидкостями, близькими до заданої швидкості руху при

великих негативних опорах руху (на затяжних спусках).

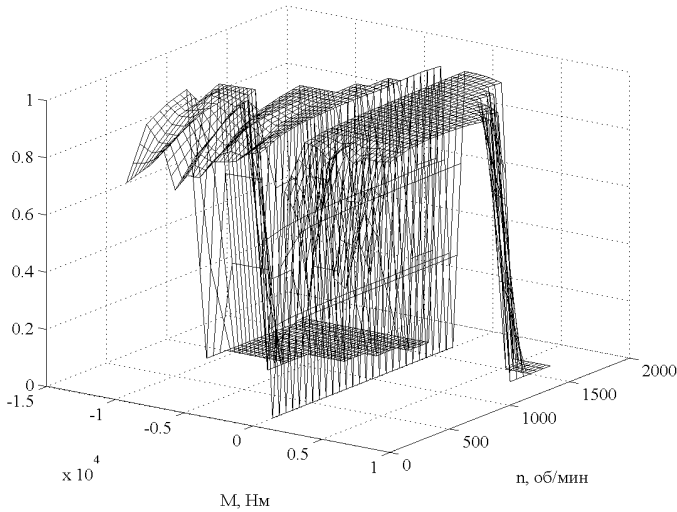


Рис. 1 – Оптимальне значення ККД приводу в режимі з просторово-векторною модуляцією.

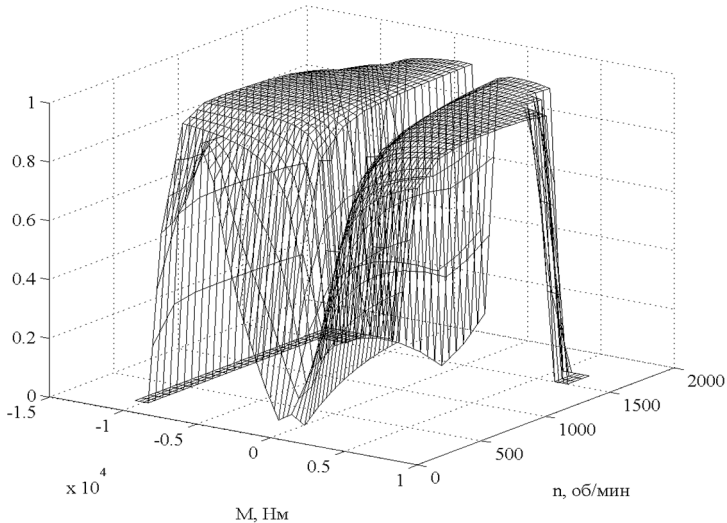


Рис. 2 – Оптимальне значення ККД приводу в режимі з однократної широтно-імпульсної модуляції.

Ці режими узгоджуються з *принципом максимуму Понтрягіна* [7], згідно з яким, рух поїзда має здійснюватися з максимальною силою тяги для досягнення встановленої швидкості руху або на вибігу.

Як показники ефективності для електрорухомого складу розглядалися

різні величини. Найбільше розповсюдження отримав показник витрати енергії. Проте при розгляді питання про створення швидкісного електрорухомого складу на перший план виходить час руху. Тому для цього показника можливо обирати середню швидкість руху електропоїзду. Ці два показники можуть бути взаємно суперечливими, тому для ухвалення рішення за визначенням кращого типу пропонується ввести відносний показник ефективності, методика визначення якого приведена в [4] В сукупності ці показники складають комплексний критерій ефективності.

Для електропоїзду з параметрами наведеними в табл. 1 були визначені криві руху поїзду приведені на рис. 3.

Таблиця 1 – Параметри приміського електропоїзда

Параметр	Величина
Конструкційна швидкість, км/год	160
Експлуатаційна швидкість, км/год	140
Прискорення, до швидкості 60км/год, м/с ²	0,75
Потужність на валу, кВт	470
Навантаження на вісь, т	17
Маса складу, т	136
Діаметр колеса по кругу катання, м	0,91
Категорія шляху	III
Керівний ухил, %	20
Радіус кривої, м	600
Максимальна швидкість руху на перегоні за умов шляху, км/год	202
Мінімальна швидкість руху на перегоні, км/год	90
Максимальна швидкість руху ЕРС, км/год	140

Як видно з кривих руху для приміських електропоїздів швидкість електропоїздів всіх типів монотонно зростає, тяговий привід працює в режимі максимальної сили тяги та досягає заданої швидкості на дуже короткому інтервалі часу, далі вона знижується зважаючи на заданий графік руху з використанням електричного гальмування. Далі швидкість підтримується нижче заданій швидкості руху, настає черга режиму тяги при максимальному ККД і вибігу. На інтервалі від 2500 до 3500 м від початку руху розташована рівна ділянка без кривих обмежень швидкості руху, на якому також спостерігається розгін електропоїзду. Проте на цій ділянці задана швидкість не була досягнута, оскільки для дотримання графіка руху приблизно на відстані 3100 м електропоїзд перейшов в режим рекуперативного гальмування. На ділянці від 3500 м до 5500 м – зтяжний спуск. На відрізку від 3500 м до 4000 м швидкість підтримується постійній шляхом включення рекуперативного гальмування. В інтервалі від 3500 м до 5000 м швидкість зростає, у зв'язку з поступовим зняттям обмежень; тут тяговий привід працює в режимі тяги в

поєднанні з режимом вибігу.

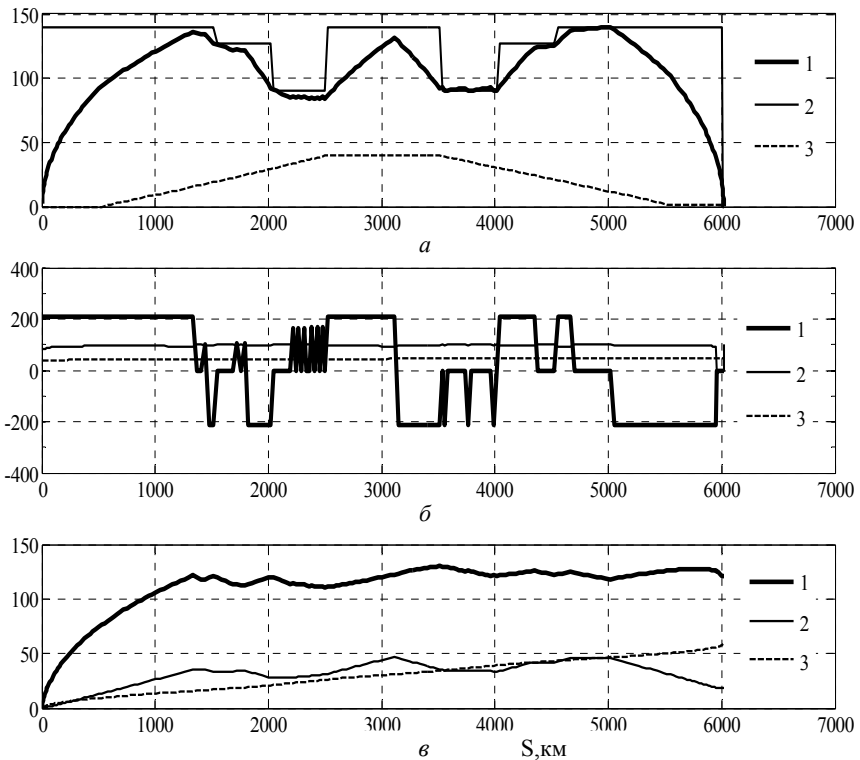


Рис. 3 – Криві руху приміського електропоїзда : *а* – 1 – швидкість руху, км/год, 2 – задана швидкість руху, км/год, 3 – профіль шляху, м; *б* – 1 – момент на валу тягового двигуна /100, 2 – ККД, %, 3 – температура тягового двигуна, °С; *в* – 1 – відносний показник ефективності 1000, 2 – витрата енергії, кВт ч, 3 – час руху/4, с.

Визначена залежність витрати енергії, середньої швидкості руху і відносного показника ефективності приміського електропоїзда, забезпеченого асинхронним тяговим приводом і працюючого в оптимальних режимах, від максимальної швидкості руху на типовій ділянці шляху, наведені в табл. 2.

З табл. 2 видно, що збільшення максимальної швидкості руху з 120 до 140 км/год приводить не тільки до збільшення середньої швидкості руху електропоїзда, але і до зменшення витрати енергії з 19,72 кВт·год до 18,98 кВт·год, що обумовлене роботою приводу в режимах з більшими значеннями ККД.

При малих максимальних швидкостях руху від 50 до 90 км/год збільшення швидкості призводить до зростання витрати енергії, що обумовлене зростанням опору руху рухомого складу.

Згідно відносного показника ефективності кращим рішенням є застосування електропоїзда з максимальною швидкістю руху. Таким чином, раціо-

нальною швидкістю руху для розглянутого прикладу електропоїзду є максимальна швидкість 140 км/год.

Таблиця 2 – Показники ефективності приміського електропоїзда

Максимальна швидкість руху, км/год	Витрата енергії, кВт·год	Середня швидкість руху, км/год	Відносний показник ефективності
60	18,11559	53,37283	0,044693
70	18,76011	60,45623	0,04901
80	19,12355	69,30989	0,053805
90	19,72876	74,50849	0,057217
100	19,6401	80,76741	0,068667
110	19,65682	82,86961	0,083516
120	19,58958	86,45897	0,095566
140	18,98311	89,51529	0,11125

Висновки. Наведена в роботі методика дозволяє визначити раціональну максимальну швидкість руху електропоїзду. Для розглянутого в роботі приміського електропоїзду з тяговим електроприводом на основі двигуна АД917 збільшення максимальної швидкості руху приводить не тільки до збільшення середньої швидкості руху електропоїзда, але і до зменшення витрати енергії на 3,75%, що обумовлене роботою приводу в режимах з великим значенням ККД.

Список літератури: 1. Корниенко В. В., Омеляненко В.И. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 159 с. 2. Любарский Б.Г. Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава / Б.Г. Любарский, В.И. Омеляненко, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова // Локомотив-информ. – 2008. №1. – С. 16 – 19 с. 3. Любарский Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового асинхронного привода // Электрика. Курск. – 2014. – №6 –С. 5 – 10 с. 4. Любарский Б. Г. Теоретичні основи для вибору і оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.22.09 / Любарський Б.Г.; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків, 2014. – 36 с. 5. Коллахчян П.Г. Адаптивное управление асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов. – Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. региона». – 2006. – 131 с. 6. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. [3-е издание] / Л.С. Понтрягин и др. – М. Наука, 1976. – 392с. 7. Мугиншейн Л.А., Илютович А.У., Ябко И.А. Энергооптимальные методы управления движением поездов. – М.: Интекст, 2012. – 80с. 8. Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов. – Харьков: Изд. Центр «НТМТ», 2013. – 248с.

Bibliography (transliterated): 1. Kornienko, V. V., and V. I. Omel'janenko. *Vysokoskorostnoj elektricheskij transport. Mirovoj opyt.* Kharkov: NTU «KhPI», 2007. Print. 2. Ljubarskij, B. G., et al. "Elektrodvigateli dlja perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava." *Lokomotiv-inform.* No. 1. 2008. 16–19. Print. 3. Ljubarskij, B. G. "Optimizacija rezhimov raboty tjagovogo asinhronnogo privoda." *Elektrika.* No. 6. Kursk, 2014. 5–10. Print. 4. Ljubarskij, B. G. *Teoreticheskie osnovy dlja vyboru i ocinky perspektivnyh sistem elektromehanichnogo peretvorennja energii' elektroruhomogo skladu. Avtoref. dys. d-ra tehn. nauk.* Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. Print. 5. Kollpach'jan, P. G. *Adaptivnoe upravlenie asinhronnym tjagovym privodom magistral'nyh elektrovozov.* Rostov n/D: Izd-vo zhurn. «Izv. vuzov. Sev.-Kavk. regiona», 2006. Print. 6. Pontryagin, L. S., et al. *Matematicheskaja teorija optimal'nyh processov.* 3rd ed. Moscow: Nauka, 1976. Print. 7. Muginshejn, L. A., A. U. Iljutovich and I. A. Jabko.

УДК 519.254

Р.П. МИГУЩЕНКО, д-р техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
М.М. ВОЛОБУЄВ, канд. хім. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
О.М. РЕБРОВА, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»

КОВАРІАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ПРИ ОБРОБЦІ ТРИВИМІРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Розглянуто питання автоматичного формування множин статистик Фішера, які однозначно характеризують стан об'єкта контролю, управління або ідентифікації, за рахунок використання методів статистичного аналізу. Формування множини F – статистик здійснюється застосуванням коваріаційного аналізу до тривимірних зображень об'єкта, шляхом проведення ряду перетинів вздовж осей аргументів. Результатом виконання перетинів є множини з координатами F_0 , F_1 , F_2 , F_3 . Проведені дослідження можуть бути використані для розробки алгоритмічного та програмного забезпечення засобів виявлення дефектів складного промислового обладнання. Розроблене програмне забезпечення може бути застосованим при імітаційному моделюванні.

Ключові слова: F – статистика, коваріаційний аналіз, регресії, двовимірна модель, трансформація, архів даних.

Вступ. Неруйнівний контроль та безрозбірна діагностика є найбільш перспективними напрямками при побудові сучасних систем контролю і управління. Останнім часом у названих напрямках активно створюються алгоритми, що реалізують названі технології, які ґрунтуються на опрацюванні вимірюваної інформації від датчиків, встановлених на важливих вузлах складних промислових агрегатів, і представленні цієї інформації у вигляді тривимірних зображень [1, 2]. Перетворення тривимірних зображень в двовимірні дозволяє спростити представлену інформацію та використати її в системах контролю і управління, які працюють в режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень. Відповідно до [3, 4] будь яку тривимірну інформаційну модель можна замінити скінченною множиною двовимірних моделей:

$$\{V_{jl} = F_a[a_j | b_l = \text{const}] + \delta_{jl}\}_{l=1}^L; \quad (1)$$

$$\{V_{jl} = F_b[b_l | a_j = \text{const}] + \varepsilon_{jl}\}_{j=1}^J. \quad (2)$$

Функції F_a і F_b це не випадкові функції (*тренди*), а δ_{jl} і ε_{jl} – випадкові величини (*випадкові залишки*). Функції F_a і F_b можна оцінити, представивши їх послідовностями лінійних регресій з випадковими коефіцієнтами. Коваріаційний аналіз таких послідовних випадкових регресій (груп двовимірних спостережень) дозволяє виявити статистично значущі адитивні і мульти-