

УДК 629.429.3:621.313

Б.Г. ЛЮБАРСЬКИЙ**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ РУХУ ПРИМІСЬКОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДУ З СИНХРОННИМИ 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 з синхронними тяговими двигунами зі збудженням від постійних магнітів на підставі комплексного критерію ефективності. Для розглянутого в роботі приміського електропоїзду з тяговим електроприводом на основі синхронного тягового двигуна зі збудженням від постійних магнітів збільшення максимальної швидкості руху з 50 до 140 км/ч приводить до зростання витрати енергії, що обумовлене зростанням опору руху рухомого складу.

Згідно відносного показника ефективності кращим рішенням є застосування електропоїзда з максимальною швидкістю руху.

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

Вступ. Визначальною системою 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], але в останні час все провідні світові виробники електрорухомого складу приділяють більше уваги тяговому приводу на базі синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів [1–5]. Підвищена надійність і успіхи в створенні сучасних постійних магнітів, наявність стандартних технічних рішень в області напівпровідникової перетворювальної техніки призвели до можливості використання приводу цього типу [1–4]. Застосування електрорухомого складу з синхронним 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 обертати в по комплексному критерію ефективності [4].

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

Матеріал дослідження. 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:

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

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

Втрати в тяговому в перетворювачі залежать як від вектора режиму роботи тягового приводу, так і від параметрів управління (коефіцієнту модуляції та куту навантаження) 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 для приміського електропоїзду, розробленого фахівцями RTRI (Японія)[5] оптимальне 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 урахує вплив частин, що обертаються, на прискорення руху електропоїзда.

Сила тяги і гальмування залежать від режиму роботи тягового приводу. На реально існуючих ділянках колії мінімізація витрати енергії є складною многокритеріальною 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, яке здійснюється для розгону; рух на вибігу при русі на швидкості близькій до заданої; рух з максимальною силою гальмування при вимозі різкого зниження швидкості руху зважаючи обмеження швидкості руху згідно з графіком руху; рух при роботі електроприводу з максимальним ККД в режимі тяги при русі зі швидкостями близькими до за-

даної швидкості руху при великих опорах руху (на затяжних підйомах); рух при роботі електропривода з максимальним ККД в режимі гальмування - русі зі швидкостями близькими до заданої швидкості руху при великих негативних опорах руху (на затяжних

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

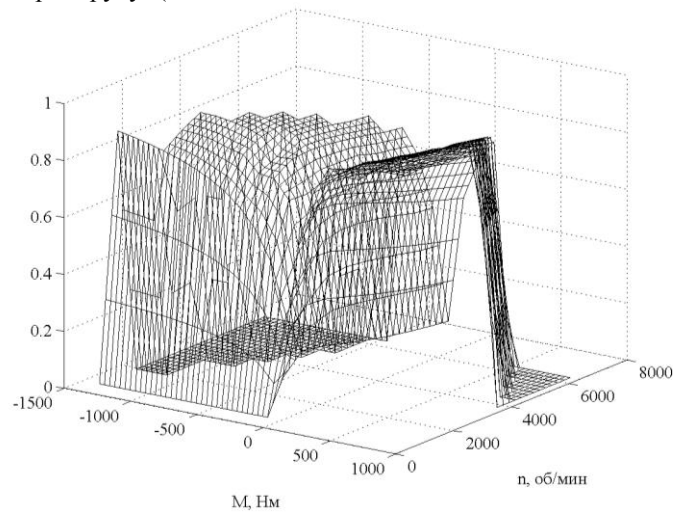


Рис. 1 – Оптимальне значення ККД приводу в режимі з просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції

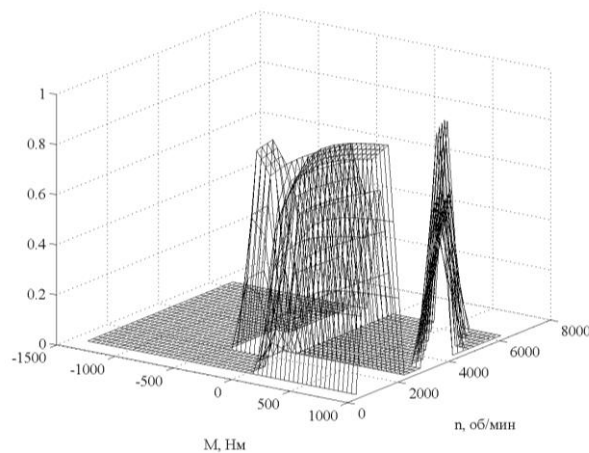


Рис. 2 – Оптимальне значення ККД приводу в режимі з однократною широтно-імпульсною модуляцією

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 суперечливий, 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	235
Навантаження на вісь, т	17
Маса складу, т	136
Діаметр колеса по колу катання, м	0,91
Категорія шляху	III
Керівний ухил %	20
Радіус кривий, 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 заданій на дуже короткому інтервалі часу, далі вона знижується зважаючи на заданий графік руху з використанням електричного гальмування. Далі швидкість підтримується нижче заданій швидкості руху, чергує режим тяги при максимальному ККД і вибігу. На інтервалі від 2500 до 3500 м від початку руху рівна ділянка без кривих обмежень швидкості руху, на якому також спостерігається розгін еле-

ктропоїзду. 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 – затяжний спуск. На від 3500 м до 4000 м швидкість підтримується постійній шляхом включення рекуперативного гальмування. В інтервалі часу від 3500 м до 5000 м швидкість зростає, у зв'язку з поступовим зняттям обмежень. Тяговий привід працює в режимі тяги в поєднанні з режимом вибігу.

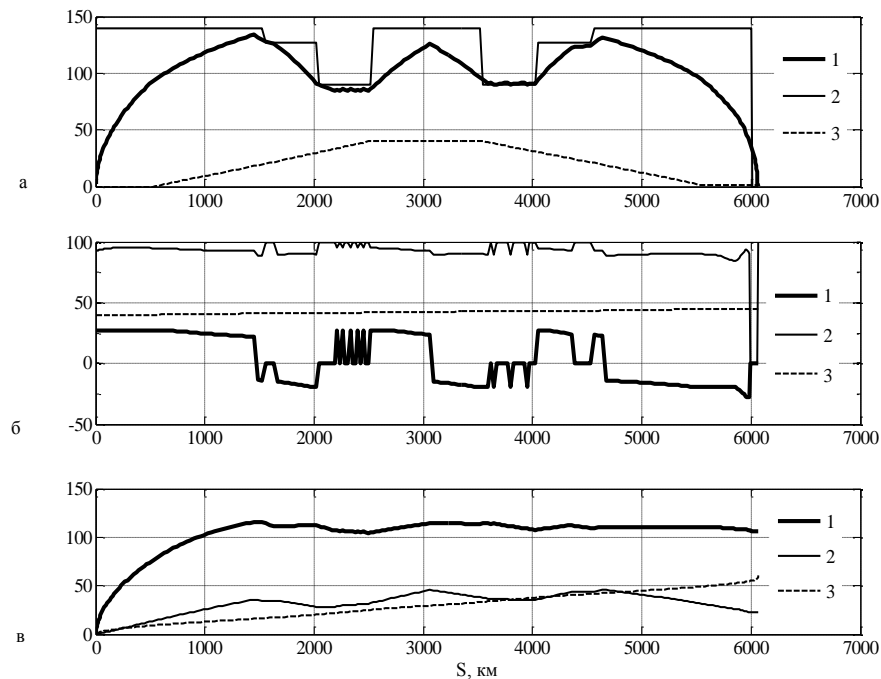


Рис. 3 – Криві руху приміського електропоїзда : а – 1-швидкість руху, км/ч, 2-задана швидкість руху, км/ч, 3- профіль шляхи, м; б – 1-момент на валу тягового двигуна /100, 2– ККД, %, 3– температура тягового двигуна, °С, в – 1– відносний показник ефективності 1000, 2– витрата енергії, кВт ч, 3– час руху/4,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

З табл. 2 видно, збільшення максимальної швидкості руху з 50 до 140 км/ч приводить до зростання витрати енергії, що обумовлене зростанням опору руху рухомого складу.

Згідно відносного показника ефективності кращим рішенням є застосування електропоїзда з максимальною швидкістю руху. Тому раціонально обрати максимальну швидкість руху на рівні 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	19,57209	53,71714	0,044838
70	20,46141	61,76462	0,047252
80	20,74711	69,54449	0,052182
90	21,21265	76,44845	0,058524
100	21,44512	82,71002	0,066724
110	21,98793	85,26754	0,079288
120	22,48996	88,49821	0,096472
140	22,91404	89,87218	0,1133

Висновки Таким чином наведена в роботі методика дозволяє визначити раціональну максимальну швидкість руху електропоїзду. Для розглянутого в роботі приміського електропоїзду з тяговим електроприводом на основі синхронного тягового двигуна зі збудженням від постійних магнітів збільшення максимальної швидкості руху з 50 до 140 км/ч приводить до зростання витрати енергії, що обумовлене зростанням опору руху рухомого складу.

Згідно відносного показника ефективності кращим рішенням є застосування електропоїзда з максимальною швидкістю руху.

Список літератури: 1. Корниенко В. В. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт / В. В. Корниенко, В. И. Омеляненко – 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 3. Любарский Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового привода на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов /Б.Г. Любарский// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Х.:УкрДАЗТ.– 2014. – № 2(105)– С. 21–24 4. Любарський 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. Hiroshi Hata Development of Traction Motor for a Gauge Change Train./ Hiroshi Hata, Mirou Kondo, Koichi Matsuoka // Quarterly Report of RTRI. –2003. – Vol. 44, No. 3. – P. 117-120. 6. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. [3-е издание]/ Л.С. Понтрягин и др. – М. Наука, 1976. – 392с. 7. Мугиншейн Л.А. Энергооптимальные методы управления движе-

нием поездов/ Л.А. Мугиншейн, А.У. Илютович, И.А. Ябло – М.: Интекст, 2012. – 80с. 8. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движения дизель-поездов./ В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный – Харьков: Изд. Центр «НТМТ», 2013. – 248с.

Bibliography (transliterated): 1. Kornienko V. V. Vysokoskorostnoy elektricheskiy transport. Mirovoy opyt / V.V. Kornienko, V. I. Omelyanenko – Kharkov: NTU «KhPI», 2007. – 159 p. 2. Lyubarskiy B.G. Elektrodvigateli dlya perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava / B.G. Lyubarskiy, V.I. Omelyanenko, E.S. Ryabov, A.V. Demidov, T.V. Glebova // Lokomotiv-inform. – 2008. No1– P. 16–19 3. Lyubarskiy B.G. Optimizatsiya rezhimov raboty tyagovogo privoda na osnove sinhronnogo dvigatelya s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov /B.G. Lyubarskiy// Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zallzничnomu transporti – Kharkov: UkrDAZT.– 2014. – No 2(105)– P. 21–24. 4. Lyubarskiy B. G. Teoretichni osnovi dlya voboru i otslnki perspektivnih sistem elektromehanіchnogo peretvorenniya energiyi elektroruhomogo skladu: avtoref. dis. d-ra tehn. nauk : 05.22.09 / Lyubarskiy B.G.; Nats. tehn. un-t " Kharkiv. polltehn. In-t". Kharkiv, 2014. - 36 p. 5. Hiroshi Hata Development of Traction Motor for a Gauge Change Train./ Hiroshi Hata, Mirou Kondo, Koichi Matsuoka // Quarterly Report of RTRI. – 2003. – Vol. 44, No. 3. – P. 117-120. 6. Pontryagin L.S. Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov. [3-e izdanie]/ L.S. Pontryagin i dr. – Moscow Nauka, 1976. – 392p. 7. Muginsheyn L.A. Energooptimalnyie metodyi upravleniya dvizheniem poezdov/ L.A. Muginsheyn, A.U. Ilyutovich, I.A. Yabko – Moscow: Intekst, 2012. – 80p. 8. Dmitrienko V.D. Modelirovanie i optimizatsiya protsessov upravleniya dvizheniya dizel-poezdov./ V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovortnyi – Kharkiv: Izd. Tsentr «NTMT», 2013. – 248p.

Надійшла (received) 07.05.2015

Відомості про автора/ Сведения об авторе / About the Author

Любарський Борис Григорьевич – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры электрического транспорта и тепловозостроения.

Lubarsky Boris Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of electrical transport and locomotive bilding.