

УДК 629.429.3:621.313

О.М. Петренко¹, Б.Г. Любарський²¹Харківський університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РУХУ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНУ З АСИНХРОННИМИ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ НА ДІЛЯНЦІ КОЛІЇ З ВСТАНОВЛЕНИМ ГРАФІКОМ РУХУ ТА ПРОФІЛЕМ

В статті розроблено методику визначення оптимальних режимів руху трамвайного вагону Т-3ВПА з асинхронними тяговими двигунами для ділянки колії з заданим графіком руху на основі метода Гамільтона-Якобі-Беллмана. Визначення режимів роботи тягового приводу запропоновано проводити заздалегідь на підставі вирішення задачі умовної оптимізації його режимів.

Ключові слова: трамвайний вагон з асинхронним тяговим приводом, асинхронний тяговий двигун, оптимальні режими руху, метода Гамільтона-Якобі-Беллмана, ефективність тягового приводу.

Вступ

Оптимізація руху електрорухомого складу (ЕРС) на ділянці колії з заданим профілем та швидкісними обмеженнями є актуальною науково-технічною проблемою вирішення якої займаються багато провідних вчених в царині залізничного транспорту [1-5]. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є створення експертних систем ведення ЕРС, що дозволяють визначити режими роботи тягового приводу в залежності від знаходження ЕРС на ділянці колії, часу його руху та швидкості.

Аналіз останніх досліджень. У роботах [5 – 10] автори стверджують, що хоча задачі у безперервній часовій області можуть бути вирішені за допомогою традиційних методів, таких як метод Лагранжа і нелінійного програмування, але якщо проблеми сформульовані в дискретній формі шляхом ділення часу (чи відстані) на кінцеве число інтервалів, моделі реального часу (чи простору) можливо використати в якості експертної системи управління рухом ЕРС. Для даного завдання, часова область розділена на кінцеве число інтервалів часу.

Загальною проблемою стохастичного управління є складність рішення і експоненціальна залежність зростання потреби у кількості пам'яті і обчислювального часу. Причина в тому, що стан об'єкту дослідження має бути представлений у вигляді дискретної області координат, що і призводить до експоненціального зростання кількості розрахункових точок, що вимагає експоненціально наростаючу кількість обчислень [6]. В цьому випадку рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана, а конкретніше – «зворотний підхід Беллмана», дозволяє отримати рішення при прийнятній кількості обчислень. «Зворотний підхід Беллмана» є методом, який вирішує дискретне перетворення систем реального часу [8]. Оскільки вирішувана задача у сво-

їй основі представляє завдання оптимального управління у безперервній часовій області, необхідно представити формулювання загальної задачі оптимального управління в реальному часі. В роботі [9] розроблена математична модель системи управління електрорухомим складом, заснована на рішенні рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана з використанням методу динамічного програмування і зворотного рішення задачі відносно координати часу. На основі цієї моделі в роботі [10] розроблена методика ідентифікації режимів роботи напівпровідникового перетворювача для живлення тягового асинхронного двигуна (АТД).

Мета статті: розробити методику визначення оптимальних режимів руху трамвайного вагону Т-3ВПА для ділянки колії з заданим графіком руху.

Результати досліджень

Ефективність тягового приводу можливо навести у вигляді виразів:

$$\eta_1 = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} U_{op} = 1; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ F_d \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v < v_{max}; \\ F_d > 0; \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} U_{op} = 2; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v < v_{max}; \\ F_d > 0; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} U_{op} = 3; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v < v_{max}; \\ F_d < 0; \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} U_{op} = 5; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ F_d \rightarrow \min, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v < v_{max}; \\ F_d < 0, \end{array} \right. \end{cases} \quad (1)$$

де η_1 – ККД ланки автономний інвертор напруги АТД – автономний інвертор напруги (АІН), U_{op} –

режим роботи тягового приводу ЕРС, F_d – сила тяги або гальмування, яку створює ЕРС, F'_k – сила обмеження за зчепленням контакту колесо-рейка, v – швидкість рухомого складу, v_{max} – конструктивна швидкість руху. $U_{OP} = 4$ – режим вибігу – холостого ходу, тому він не розглядається при визначенні ефективності приводу.

Визначення ККД ланки АТД – АН проводиться на основі підходів запропонованих у роботах [1, 11 – 13] що включають в себе наступне: для вирішення задачі визначення оптимальних режимів роботи тягового приводу необхідно вирішити чотири задачі умовної оптимізації параметрів роботи тягового приводу (в режимах розгону $U_{OP} = 1$, режим рекуперативного гальмування $U_{OP} = 5$, режим підтримання заданої швидкості руху $U_{OP} = 2,3$). Для кожний з цих задач необхідно розглянути два режиму: застосування однократної або просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Режим розгону та режим рекуперативного гальмування схожі між собою. Застосуємо метод векторних цільових функцій запропонований в роботі [14]. У якості цільової функції для режиму розгону оберемо векторну функцію з наступними параметрами:

$$F_{c1} = \begin{bmatrix} 1 - \eta_l \rightarrow \min, \\ -F_d \rightarrow \min, \end{bmatrix} \quad (2)$$

Перший компонент обрано таким чином, що при його мінімізації приходить максимізація ККД тягового приводу.

Для режиму рекуперативного гальмування векторна цільова функція має вигляд:

$$F_{c5} = \begin{bmatrix} 1 - \eta_l \rightarrow \min, \\ F_d \rightarrow \min, \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для режиму підтримання заданої швидкості руху у якості цільової функції оберемо:

$$F_{c3} = F_{c4} = 1 - \eta_l \rightarrow \min \quad (4)$$

Таким чином було обрано цільові функції для визначення оптимальних режимів роботи тягового приводу, які дозволяють визначити оптимальні режими тягового приводу при застосуванні різних режимів ШІМ.

У якості методу оптимізації прийнятий комбінований генетичного алгоритму: глобальний пошук здійснюється генетичним алгоритмом з одноточечним кросовером і селекцією за принципом рулетки. На завершальному етапі роботи оптимізаційної про-

цедури уточнення оптимуму здійснюється методом Нелдера - Міда за [1, 11 14]

На рис. 1 наведені оптимальні тягові характеристики трамваю Татра Т3 ВПА в робочих режимах. При застосуванні однократної ШІМ у режимі тяги та гальмування з'являється зона в якій неможлива робота тягового приводу (0...620 об/хв), що зумовлена неможливістю зниження напруги двигуна, а як слід, ростом фазного струму при малих частотах обертання.

У роботі [9, 10] описане загальне формулювання оптимального управління в реальному часі таким чином.

Програмно-орієнтована модель руху ЕРС.

Розглянемо представлення рівняння руху потягу в програмно-орієнтованому виді, що дозволить її використати для визначення оптимальних законів управління згідно з методом Гамільтона-Якобі-Беллмана. У цій роботі сили і опори розраховуються таким чином:

Сила прискорення F_A (для одного часового кроку):

$$F_A = m \frac{v(t) - v(t - tstep)}{tstep}, \quad (5)$$

де m – маса потягу, доданок

$$a = \frac{v(t) - v(t - tstep)}{tstep}, \quad (6)$$

де a – еквівалентне постійне прискорення, якому піддається потяг при різниці швидкостей

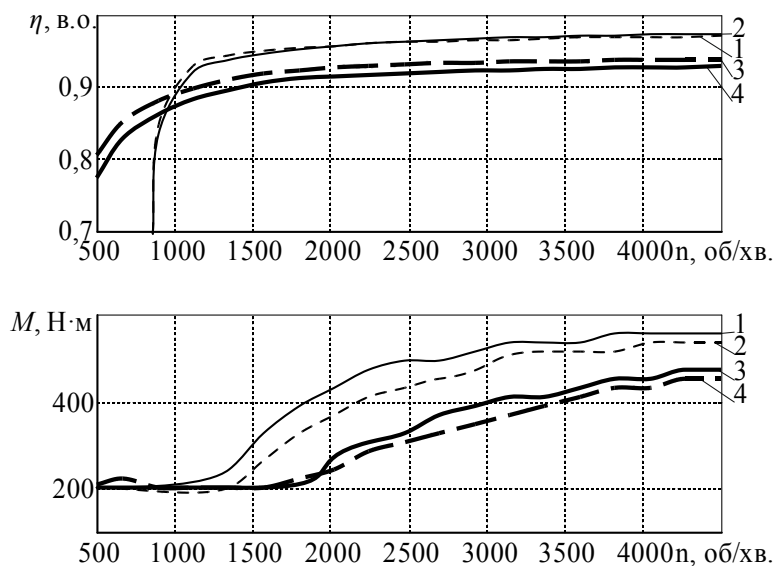


Рис. 1. Оптимальні залежності ККД та електромагнітного моменту тягового приводу трамваю в режимі $U_{OP} = 3$: 1 – при застосуванні однократної ШІМ та при температурі двигуна 40 °С, 2– при застосуванні однократної ШІМ та при температурі двигуна 180 °С, 3– при застосуванні просторово-векторної ШІМ та при температурі двигуна 40 °С, 4– при застосуванні просторово-векторної ШІМ та при температурі двигуна 180 °С

$v(t) - v(t - tstep)$ за один часовий крок, обумовлене допущенням, що для кожного часового кроку прискорення постійне, а швидкість лінійно залежить від часу для кожного часового кроку.

Основний опір коченню $F_{гр}$ (для одного часового кроку). Оскільки швидкість лінійно залежить від часу для кожного переходу (часового кроку), опір коченню для кожного часового кроку може бути вичислений відповідно до середньої швидкості кроку, яка дорівнює:

$$v_{avg} = \frac{v(t) + v(t - tstep)}{2}. \quad (7)$$

Таким чином, основний опір руху для кожного часового кроку буде:

$$F_{гр} = a_{гр} + b v_{avg} + c v_{avg}^2. \quad (8)$$

де $a_{гр}, b, c$ – коефіцієнти які для трамвайного вагону Т-3 ВПА масі з повною загрузкою, що становить 30000 кг, мають наступні значення 1500 Н, 0 Н с/м, та 1,5 Н с²/м відповідно.

В результаті сила, потрібна для переміщення ЕРС на $tstep$:

$$F_{tot} = (1 + \gamma)F_A + F_{гр} + F_s + F_{rk}. \quad (9)$$

де F_s, F_{rk} – сили опору від уклонів та кривих що визначаються такими співвідношеннями:

$$F_{rs} = m g \frac{i}{1000}, \quad (10)$$

$$F_{rk} = \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} m, \quad (11)$$

де c_{r0}, c_{r1} – постійні відомі коефіцієнти, що визначаються за [15]; R – радіус кривої, i – ухил, g – прискорення вільного падіння.

Необхідна енергія для руху потягу на $tstep$ з урахуванням обмежень та допущення про те, що швидкість міняється лінійно з часом на основі [15] визначається:

$$\left\{ \begin{aligned} E &= \sum_{t=tstep}^T \frac{\text{sign}}{(\eta_1)^{\text{sign}}} \left(\begin{aligned} &(1 + \gamma)F_A + a_{гр} + \\ &+ b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 + \\ &+ \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000} \end{aligned} \right) \times \\ &\times \frac{v(t) + v(t - tstep)}{2} \cdot tstep; \\ &\left| \begin{aligned} &(1 + \gamma)F_A + a_{гр} + b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 + \\ &+ \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000} \end{aligned} \right| \leq \\ &\leq 9,81 k_s m \cdot 1000, \end{aligned} \right. \quad (12)$$

де k_s – коефіцієнт зчеплення, що для трамваю становить 0,16, v_{avg} – середня швидкість руху на кроку.

Для часового кроку переходу зі стану $n - 1$ до стану n , з рівняння рівноприскореного руху, пройдена відстань може бути отримана таким чином:

$$\Delta x_n = v_{n-1} \Delta t_n + \frac{1}{2} a_n \Delta t_n^2,$$

$$\Delta x_n = v_{n-1} \cdot \Delta t_n + \frac{1}{2} \frac{v_n - v_{n-1}}{\Delta t_n} \Delta t_n^2 \Rightarrow$$

$$\Delta x_n = v_{n-1} \Delta t_n + \frac{1}{2} v_n \Delta t_n - \frac{1}{2} v_{n-1} \Delta t_n \Rightarrow (13)$$

$$\Delta x_n = \frac{1}{2} (v_{n-1} + v_n) \Delta t_n \Rightarrow$$

$$x_n - x_{n-1} = \frac{1}{2} (v_{n-1} + v_n) \Delta t_n \Rightarrow$$

$$x_n = x_{n-1} + \frac{1}{2} (v_{n-1} + v_n) \Delta t_n.$$

де x_n, v_n, a_n – положення потягу, його швидкість та прискорення на n кроці.

Для 1 часового кроку маємо

$$x_t = x_{t-tstep} + \frac{1}{2} (v_{t-tstep} + v_t) tstep, \quad (14)$$

де x_t – кінцеве положення потягу для одного $tstep$; $x_{t-tstep}$ – початкове положення потягу для одного $tstep$;

Вираз (14), дає кінцеве положення потягу для переходу, коли відомі початкове положення, початкова і кінцева швидкість, а також значення часового кроку.

Вирішення задачі оптимізації режимів руху проводилось для ділянки колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного коло (602 мр/н, м. Харків) та в зворотному напрямці параметри якої наведені в табл. 1.

Результати вирішення тягової задачі при руху трамваю в оптимальному режимі наведені на рис. 2.

При русі трамвайного вагону на ділянці колії було визначено наступне.

Витрати енергії встановили 18,56 кВт·год, час руху встановив 1098 с, що відповідає середній швидкості руху 40,1 км/год при заданій середній швидкості 40 км/год.

Сила тяги має пульсуючий характер який необхідне для підтримання заданої швидкості руху.

Висновки

1. Розроблено методику визначення оптимальних режимів руху трамвайного вагону Т-3ВПА з асинхронними тяговим двигунами для ділянки колії с заданим графіком руху на основі метода Гамільтона-Якобі-Беллмана. Визначення режимів роботи тягового приводу запропоновано проводити задалегідь на підставі вирішення задачі умовної оптимізації його режимів.

Таблиця 1

Параметри ділянки колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного кола
(602 мр/н, м. Харків)

Номер ділянки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Довжина ділянки, м	70	216	386	460	520	735	590	90	60	70
Ухил, ‰	0	-15	32	-27	22	-17	-62	-33	14	32
Радіус кривій, м	60	0	0	0	0	0	0	110	170	230
Максимальна швидкість, км/год	10	60	60	40	60	60	60	50	60	60

Номер ділянки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Довжина ділянки, м	317	100	320	770	30	50	40	650	546	90
Ухил, ‰	25	22	12	19	0	0	0	14	0	0
Радіус кривій, м	0	600	0	0	30	0	35	0	0	0
Максимальна швидкість, км/год	60	60	60	60	40	60	40	60	60	60

Номер ділянки	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Довжина ділянки, м	120	100	120	90	546	650	40	50	30	770
Ухил, ‰	0	0	0	0	0	-14	0	0	0	-19
Радіус кривій, м	70	30	70	0	0	0	35	0	30	0
Максимальна швидкість, км/год	60	40	60	60	60	60	40	60	40	60

Номер ділянки	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Довжина ділянки, м	320	100	317	70	60	90	590	735	520	460	386	216
Ухил, ‰	-12	-22	-25	-32	-14	33	62	17	-22	27	-32	15
Радіус кривій, м	0	600	0	230	170	110	0	0	0	0	0	0
Максимальна швидкість, км/год	60	60	60	60	60	50	60	60	60	40	60	60

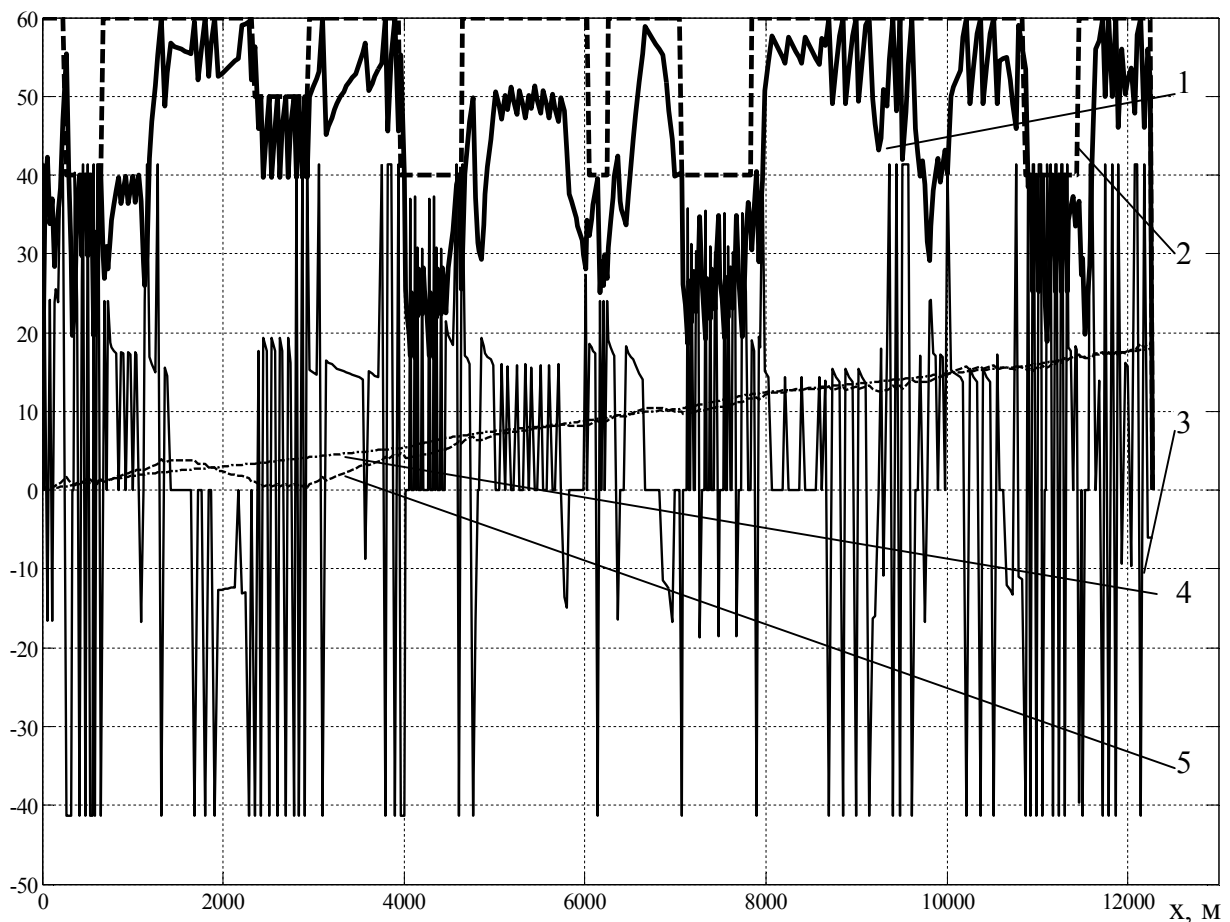


Рис. 2. Результати вирішення тягової задачі при русі трамвайного вагона Т-3ВПА з тяговим двигуном АД931 на ділянках колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного кола (602 мр/н, м.) та в зворотному напрямці параметри. 1 – швидкість руху (v), км/год; 2 – обмеження швидкості, км/год; 3 – сила тяги, ($F_{ТТ}$) кН; 4 – час руху (t), хв, 5 – витрати енергії (E), кВт·год

2. Для визначення оптимальних режимів роботи тягового приводу було обрано комбінований метод: глобальний пошук здійснюється генетичним алгоритмом з однокочним кросовером і селекцією за принципом рулетки. На завершальному етапі роботи оптимізаційної процедури уточнення оптимуму здійснюється методом Нелдера - Міда.

3. Було проведено оптимізацію режимів роботи тягових приводів трамвая Татра ТЗВПА у всьому діапазоні частот обертання АТД. Встановлені залежності переходу тягового приводу з режиму просторово-векторної до однократної ШІМ в залежності від температури обмоток.

4. При русі трамвайного вагону на ділянці колії було визначено наступне: Витрати енергії встановили 18,56 кВт·год, час руху встановив 1098 с, що відповідає середній швидкості руху 40,1 км/год при заданій середній швидкості 40 км/год. Сила тяги має пульсуючий характер який необхідне для підтримання заданої швидкості руху.

Список літератури

1. Любарський Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. - «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, - 2014. – 368 с.

2. Гетьман Г.К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта [Текст] : монография / Г.К. Гетьман. – Д.: Изд. Днепр. нац. ун-та ж/д трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.

3. Моделирование та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом : монографія / О.Б. Мокін, Б.І. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 192 с.

4. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с.

5. Петренко О.М. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи /

О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 6. – С. 8-13

6. Todorov, Emanuel. "Optimal control theory." Bayesian brain: probabilistic approaches to neural coding (2006): 269-298.

7. Kappen, Hilbert J. "Optimal control theory and the linear bellman equation." Inference and Learning in Dynamic Models (2011): 363-387.

8. Kanemoto, Yoshitsugu (1980) Appendix IV: Optimal Control Theory. In: Kanemoto, Yoshitsugu. Theories of urban externalities. Vol. 6. North-Holland, p. 189.

9. Петренко О. М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глєбова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 6 (1178). – С. 89-95.

10. Петренко О.М. Математична модель оптимального керування рухом електрорухомого складу на підставі вирішення рівнянь Гамільтона-Якобі-Беллмана / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. № 2 – С. 19-24.

11. Петренко О.М. Методика оптимізації режимів роботи асинхронного тягового приводу рухомого складу / О.М. Петренко, І.В. Доманський, Б.Г. Любарський // Механіка та машинобудування. – 2016.– №1. – С. 59-67.

12. Рябов Е. С. Анализ потерь в тяговом асинхронном двигателе при различных режимах питания / Е.С. Рябов, А.Н. Петренко, Л.В. Оверьянова // Евразийский совет ученых– 2016.– № 12(33). Ч. 2. – С. 59-65.

13. Любарский Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового асинхронного привода / Б.Г. Любарский // Электрика. Курск. – 2014. – № 6. – С. 5–10.

14. Северин В.П., Никулина Е.Н. Методы одномерного поиска. – Х.: НТУ ХПИ, 2013. – 124 с.

15. Panagiotis Gkortzas Study on optimal trainmovement for minimum energy consumption School of Innovation, Design and Engineering. – 82 p.

Надійшла до редколегії 18.09.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Т. Доманський, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ТРАМВАЙНЫХ ВАГОНОВ С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ НА УЧАСТКЕ ПУТИ С УСТАНОВЛЕННОЙ ГРАФИКОМ ДВИЖЕНИЯ И ПРОФИЛЕМ

А.Н. Петренко, Б.Г. Любарский

В статье разработана методика определения оптимальных режимов движения трамвайного вагона Т-ЗВПА с асинхронными тяговыми двигателями для участка пути с заданным графиком движения на основе метода Гамильтона-Якоби-Беллмана. Определение режимов работы тягового привода предложено проводить заранее на основании решения задачи условной оптимизации его режимов.

Ключевые слова: трамвайный вагон с асинхронным тяговым приводом, асинхронный тяговый двигатель, оптимальные режимы движения, метода Гамильтона-Якоби-Беллмана, эффективность тягового привода.

OPTIMIZATION DRIVING MODES TRAMCARS WITH ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS FOR SECTIONS WITH THE ESTABLISHED TIMETABLE AND PROFILES

O.M. Petrenko, B.G. Liubarskyi

The paper developed a method of determining the optimal modes of motion of the tram car T-3VPA with asynchronous traction motors for the road section with the set timetable on the basis of the Hamilton-Jacobi-Bellman equation. Defining modes of traction drive proposed to carry out in advance on the basis of the decision of its constrained optimization problem modes.

Keywords: tram car with induction motor drive, asynchronous traction motor, optimal modes of motion, of the Hamilton-Jacobi-Bellman equation, the traction drive efficiency.