

МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДУ РУХОМОГО СКЛАДУ

Вступ. Ефективність тягового приводу в певному режимі його роботи оцінюватимемо за критерієм максимуму його ККД за умови дотримання вимог, що накладаються режимами роботи. Тому завдання визначення ефективності тягового приводу зводиться до знаходження максимуму функції ККД приводу [1,2].

Аналіз літературних джерел. Сучасний рухомий склад залізниць створюється в основному на основі асинхронного тягового приводу [1-4]. Повішена надійність і зниження витрат на експлуатацію, наявність стандартних технічних рішень в області напівпровідникової перетворювальної техніки призвело до широкого використання приводу цього типу [1-6]. В даний час, управління тяговим приводом засноване на реалізації двох основних режимів: режим приблизно постійного моменту, в якому напруга живлення двигуна лінійно змінюється в залежності від частоти його обертання, і режим близький до режиму постійної потужності, в якому напруга живлення постійно [2-6]. На практиці ці основні режими доповнені режимами струмообмеження, при малій частоті обертання і перехідним між двома основними режимами. Однак таке управління тяговим приводом не є оптимальним за критерієм сумарного ККД так, як структура втрат в тяговому приводі досить складна.

Мета роботи розробити методику оптимізації режимів асинхронного тягового приводу за критерієм максимуму його ККД з урахуванням не лінійності магнітної системи тягового двигуна.

Математична модель. Параметрами для оцінки ефективності тягового приводу раціонально вибрати наступні: коефіцієнт модуляції (K_M) величина якого визначає значення фазної напруги тягового двигуна, величину ковзання (s) ротора і режим роботи перетворювача ШІМ - однократний або просторово-векторний. Ці величини є відносними і їх зручно використовувати для оцінки режимів роботи приводів різної потужності. Як критерій, як сказано вище вибираємо ККД приводу η .

Втрати в тяговому в перетворювачі і тяговому двигуні залежать як від вектора режиму роботи тягового приводу $[M_{зад}, n_{зад}, t_{зад}]$ (Частоти обертання, моменту на валу і температури), так і від параметрів управління – режимі роботи приводу, коефіцієнта модуляції і ковзання. Тому завдання визначення ефективності тягового приводу зводиться до знаходження функції:

$$MAX\eta = f \left(\begin{matrix} M_{зад} \\ n_{зад} \\ t_{зад} \end{matrix} \right)_{var \begin{matrix} rez \\ K_M \\ s \end{matrix}},$$

де $\begin{bmatrix} rez, \\ K_M \\ s \end{bmatrix}$ – вектор параметрів управління, складові якого: режим роботи приводу, коефіцієнт модуляції і ковзання відповідно. Для вирішення такого завдання пропонується

застосовувати методи умовної мінімізації функції.

Розглянемо два основні режими роботи тягового приводу: режим однократної ШІМ та режим просторово-векторної ШІМ. У однократному режимі форма кривої напруги не змінюється, не змінюється і його амплітуда, можливо регулювання лише частоти вихідної напруги.

Коефіцієнт модуляції для нього дорівнює:

$$K_m = \frac{2U_{л1}}{U_d} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \approx 1,56$$

У режимі просторово-векторної ШІМ напруга і частота живлення тягового двигуна змінюється. Отже, змінюється і коефіцієнт модуляції. Алгоритм розв'язання задачі аналізу має такий вигляд:

КРОК 1. Задаємося величинами частотою обертання (n), коефіцієнтом модуляції (K_m), температурою (t_r) і ковзанням (s). Для однократному режиму $K_m = 1,56$.

КРОК 2. Встановлюєте режим роботи перетворювача однократний або просторово-векторний ШІМ

КРОК 3. Визначаємо величину фазної напруги двигуна $U = \frac{\sqrt{3}}{2} U_d K_m$ та частоту живлення двигуна $f_1 = \frac{pn}{60} (1 - s)$.

КРОК 4. Поставивши попередніми значенням коефіцієнта насичення, визначаємо попередні значення параметрів схеми заміщення вектор фазного струму \dot{I}_1 та повну потужність S_1 :

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{1ном} t_r / t_{гнно} & X_1 &= X_{1ном} f_1 / f_{1ном} \\ R_2' &= R_{2ном}' t_r & X_2' &= X_{2ном}' f_1 / f_{1ном} \\ R_m &= R_{тнно} \frac{f_1^{1,5}}{k_{нас}^2} \frac{k_{насном}^2}{f_{1ном}^{1,5}} & & \\ X_m &= \left((X_{тнно} + X_{1ном}) \frac{k_{насном}}{k_{нас}} - X_{1ном} \right) \frac{f_1}{f_{1ном}} & & \\ Z &= R_1 + jX_1 + \frac{(R_m + jX_m) \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2' \right)}{\left(R_m + \frac{R_2'}{s} \right) + j(X_m + X_2')} & & \\ \dot{I}_1 &= \frac{U}{Z} & S_1 &= m U_1 \dot{I}_1^* \end{aligned} \quad (1)$$

де R_1, X_1 – активний та індуктивний опір статора, R_2', X_2' – активний та індуктивний приведенний опір кола ротора, R_m, X_m – активний та індуктивний опір кола намагні-

чування, Z – сумарний опір фази. Індекс «ном» відповідає значенням параметрів схеми заміщення для номінального режиму двигуна.

КРОК 5. Визначаємо значення коефіцієнта насичення

Коефіцієнт насичення магнітного кола залежить від струму кола намагнічування і визначається за результатами розрахунку магнітного кола [1,2,7].

Струм намагнічування для кожного певного режиму роботи за виразом:

$$I_0 = I_1 \frac{\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)}{\left(R_m + \frac{R'_2}{s} \right) + j(X_m + X'_2)} \quad (2)$$

Задаючись попереднім значенням $k_{нас}$ можливо визначити \dot{I}_1 за (1), а за (2) – \dot{I}_0 . Потім використовуючи $k_{нас} = f(I_0)$ визначаємо наступне значення $k'_{нас}$. Таким чином рекурентне співвідношення для визначення коефіцієнта насичення має вигляд:

$$k'_{нас} = f(|I_0|), \text{ де}$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)}{\left(R_m + \frac{R'_2}{s} \right) + j(X_m + X'_2)}; \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z}; \quad R_1 = R_{1ном} t_r / t_{тнно};$$

$$X_1 = X_{1ном} f_1 / f_{1ном};$$

$$R'_2 = R'_{2ном} t_r; \quad X'_2 = X'_{2ном} f_1 / f_{1ном}; \quad R_m = R_{тнно} \frac{f_1^{1,5}}{k_{нас}^2} \frac{k_{насном}^2}{f_{1ном}^{1,5}};$$

$$X_m = \left((X_{тнно} + X_{1ном}) \frac{k_{насном}}{k_{нас}} - X_{1ном} \right) \frac{f_1}{f_{1ном}}.$$

Для вирішення рекурентного рівняння запропоновано застосувати метод одновимірної мінімізації функції нев'язності [6,7] на базі методу «поділу навпіл»:

$$\begin{cases} |k'_{нас} - k_{нас}| \rightarrow \min \\ k_{нас} \in [1;3] \end{cases}$$

КРОК 6. Уточнюємо параметри схеми насичення по (1) і визначаємо сумарний комплексне опір фази двигуна:

КРОК 7. Визначаємо фазний струм двигуна по (1) і основні втрати в тяговому двигуні:

Транспортне машинобудування

$$P_{осн} = P_{m1} + P_{m2} + P_{st}$$

$$P_{m1} = m I_1^2 R_1$$

$$P_{m2} = m I_2'^2 R_2'$$

$$P_{st} = m I_0^2 R_m$$

де P_{m1} , P_{m2} и P_{st} - основні втрати в міді статора, ротора і стали відповідно.

КРОК 8. Визначаємо коефіцієнт потужності:

$$\cos\varphi = \frac{\operatorname{Re}(S_1)}{|S_1|}$$

КРОК 9. Якщо перетворювач працює в режимі просторово-векторної ШІМ по перейти до КРОК 11.

КРОК 10. Визначаємо параметри схеми заміщення для струмів вищих гармонійних $\sum P_{mi}$ и $\sum P_{sti}$ за методикою наведеною в [1,10]

КРОК 11. Визначаємо додаткові і механічні втрати в двигуні по [1,10].

КРОК 14. Визначаємо втрати в перетворювачі:

Схема технічні рішення автономних інверторів застосовуваних в розглянутих приводах в більшості конструкцій побудовані за мостовою трифазною схемою [11,12]. Прийmemo допущення про незначність втрат у снайберних колах, в системі управління інвертора і на охолодження.

Таким чином, втрати в перетворювачі складаються з втрат в IGBT транзисторах та діодах і визначаються за методиками, наведеними в [11,12].

КРОК 15. Визначаємо активну потужність споживану двигуном:

$$P_{11} = \operatorname{Re}(S_1)$$

КРОК 16. Визначаємо споживану приводом потужність:

$$P_1 = m_{дв} P_{11} + p_{np}$$

$m_{дв}$ - число тягових двигунів.

КРОК 17. Визначаємо втрати та ККД тягового приводу а також момент на валу.

$$\eta = \frac{\sum P_2}{P_1}$$

де $\sum P_2$ - потужність на валу тягового двигунів.

Потужність на валу двигунів визначається менше надходить на вхід приводу потужності на величину втрат:

$$\sum P_2 = P_d - \sum p$$

де $\sum p$ — Сумарні втрати в приводі.

Розглянемо структуру втрат в приводі:

$$\sum p = p_{np} + m_{\partial v} p_{\partial v},$$

де p_{np} — втрати у напівпровідниковому перетворювачі, $p_{\partial v}$ — втрати в одному двигуни,

Втрати в тяговому двигуні:

$$p_{\partial v} = P_{осн} + \sum P_{mi} + \sum P_{sti} + P_{\partial об} + P_{MEХ}.$$

Момент на валу двигуна визначається виразом:

$$M_2 = 9.55 \frac{P_2}{n} = 9.55 \frac{\sum P_2}{m_{\partial v} n}.$$

При вирішенні задачі оптимізації на параметри накладаються обмеження у вигляді нерівностей:

– для режиму просторово-векторної ШІМ:

$$1,414 \geq K_M \geq 0,$$

$$s_{kr} \geq s \geq 0, \text{ при } M_2 > 0;$$

– для режиму однократної ШІМ:

$$0 \geq s \geq -s_{kr},$$

де $s_{kr} = \frac{R'_2}{X_2}$ – критичне ковзання

$$I_{1\phi} < I_{\max},$$

де I_{\max} – максимальний допустимий фазний струм тягового двигуна.

У вигляді рівності:

$$M_2 = M_{зад}.$$

Таким чином, рішення задачі пошуку оптимального режиму роботи тягового приводу на основі асинхронного тягового двигуна складається з трьох основних етапів: визначення оптимального у режиму одноразової ШІМ методом одновимірного пошуку з обмеженнями; визначення оптимального режиму при просторово-векторної ШІМ методами багатокритеріальної оптимізації; порівняння результатів та вибір оптимального режиму.

Перевірка адекватності математичної моделі розрахунку параметрів та визначення оптимальних режимів роботи проводиться шляхом порівняння результатів розрахунку тягової характеристики асинхронного тягового двигуна АД 917 потужністю 470 кВт проводяться в ДП «завод Електроважмаш» [13], з даними отриманих за результатами експериментальних досліджень для серійного двигуна. Максимальне відхилення

при розрахунку втрат становить 1,92%, що цілком допустимо для проведених розрахунків.

Метод вирішення задачі. Для вирішення завдання оптимізації використаний пакет *optlab* для *MATLAB* розроблений в НТУ «ХП» [1,8,9], який дозволяє легко варіювати різними методами вирішення завдань оптимізації. Найкращі результати за часом вирішення поставленого завдання показав метод циклічного покоординатного спуску.

Результати дослідження. Оптимізації режимів роботи тягового приводу на основі АД 917 при температурі 96 °С наведені на рис. 1. Значення функції рівне нулю відповідає зоні, в якій рішення не було знайдено, тобто зоні обмеження роботи приводу. Для режиму однократної ШІМ ця зона значно менше, що пояснюється тим фактом, що лінійна напруга на асинхронного тягового двигуна в цьому режимі більше так, як більше коефіцієнт модуляції, а значить нижче струм статора, що є обмеженням при розрахунку ККД. ККД приводу в режимі просторово-векторної ШІМ вище ККД ніж в режимі однократної ШІМ до частоти обертання 400..500 об / хв. Тому, для малих швидкостей руху (малих частот обертання двигуна) тяговий привід працює в режимі просторово-векторної ШІМ, а далі переходить в однократний режим.

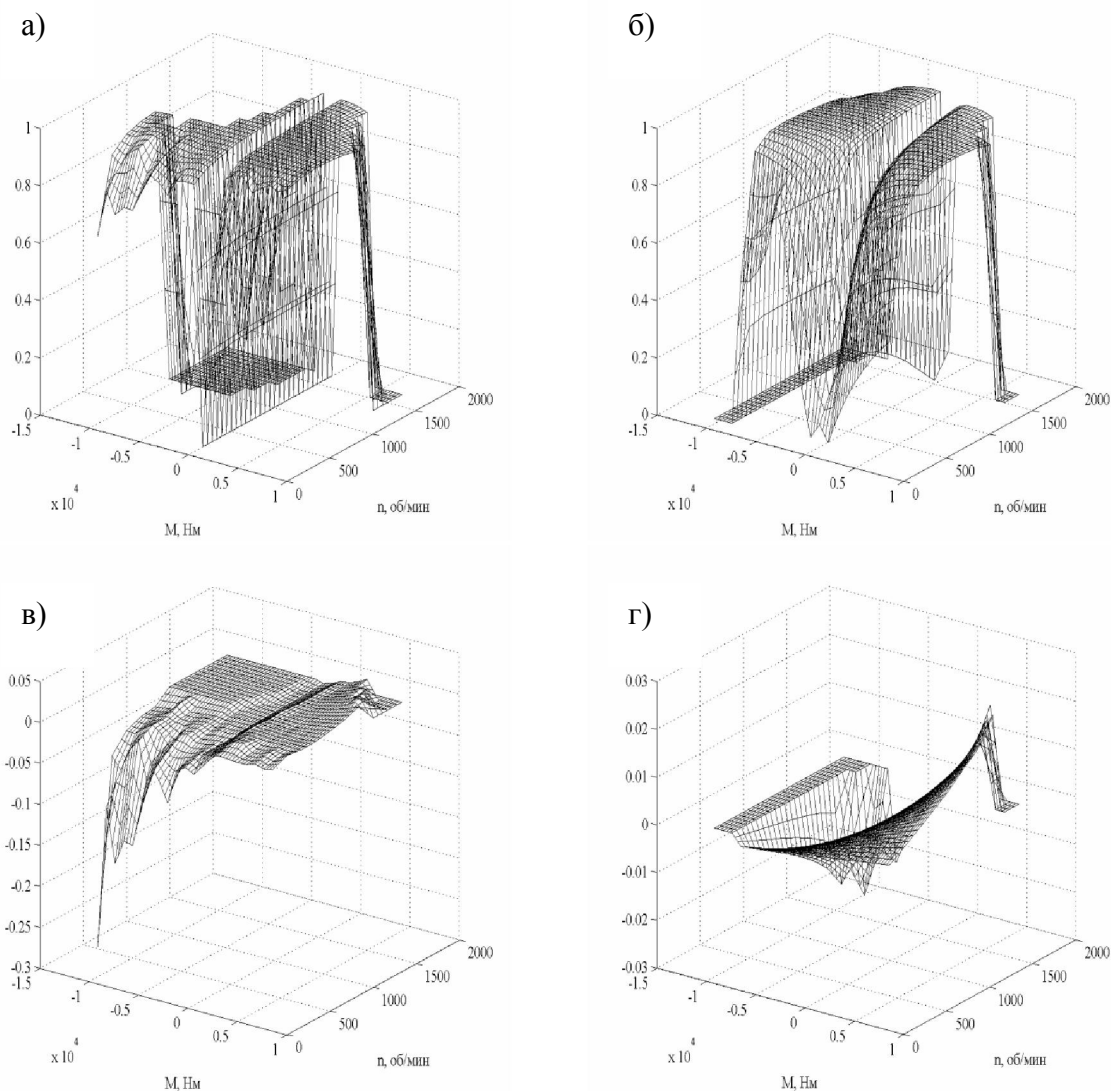


Рис.1 Оптиміальне значення ККД приводу (а та б) та ковзання (в та г) режимі: а, в – просторово-векторної ШІМ, б, г - однократної ШІМ

Ковзання двигуна зростає зі збільшенням частоти обертання в тяговому режимі, що викликано обмеженням струму ротора, і різко знижується при малих значеннях частоти обертання в гальмівному режимі в зв'язку з прагненням підвищити ЕРС двигуна. ККД електроприводу знижується при підвищенні температури обмоток, характер залежностей при цьому залишається незмінним. Отримані залежності ККД приводу апроксимувати кубічними сплайн функціями і можуть бути використані при синтезі систем управління рухомим складом і вирішенні тягової завдання руху по ділянці шляху.

Висновки. Розроблено методику визначення режимів роботи асинхронного тягового приводу на основі рішення задачі багатокритеріальної оптимізації. Обрано вектор параметрів, що складається з наступних компонентів: режим роботи приводу, коефіцієнт модуляції та ковзання. Критерієм ефективності приводу обраний ККД приводу. Визначено обмеження у вигляді нерівностей та рівності. Визначено, що для режиму однократної ШІМ зона обмеження режимів роботи значно менше, що пояснюється тим фактом, що лінійна напруга на асинхронного тягового двигуна в цьому режимі більше так, як більше коефіцієнт модуляції, а значить нижче струм статора, що є обмеженням при розрахунку ККД. ККД приводу в режимі просторово-векторної ШІМ вище ККД ніж в режимі однократної ШІМ до частоти обертання 400..500 об / хв. Тому, для малих швидкостей руху (малих частот обертання двигуна) тяговий привід працює в режимі просторово-векторної ШІМ, а далі переходить в однократний режим.

Література: 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. 368с. 2. Любарский Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового асинхронного привода / Б.Г. Любарский // Электрика. Курск– 2014 – №6 –С5–10. 3. В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова. Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей // *Залізничний транспорт України.*– 2008. – №2/1. – С. 26–31. 4. В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Рябов Е. С, А. В Демидов, Т. В. Глебова *Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава // Локомотив-інформ.* – 2008. – №1. – С. 16–19. 5. *Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями/ Н.А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В. В. Литовченко ; под ред. Ротанова Н. А. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.* 6. Колпахчян П.Г. Адаптивное управление асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов . – Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. региона», 2006. – 131 с. 7. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 2 *Машины переменного тока Изд 3 перераб, Ленинград, Энергия, 1973, 648с.* 8. Северин В. П., Никулина Е. Н. *Методы одномерного поиска.* - Харьков. : НТУ ХПИ, 2013. – 124 с. 9. Химмельблау Д. *Прикладное нелинейное программирование: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 534 с.* 10. *Находкин М.Д.(ред) Проектирование тяговых электрических машин Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта, Изд. 2, перераб. и дополн. М.: Транспорт, 1976, 624 с.* 11. *General Considerations for IGBT and IPM. Mitsubishi Application Notes.*http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/files/manuals/powermos3_0.pdf . 12. *Выбор и расчет силовых полупроводниковых приборов полупроводникового преобразователя электрической энергии : учеб.метод. пособие / В.В. Ивахно, В.В. Замаруев, О.В. Ильина. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – с. 72.* 13. БИЛТ.652433.004ПС. *Электродвигатель асинхронный тяговый типа АД914У1. Паспорт.*

Bibliography (transliterated): 1. Lyubarskiy B.G. *Teoretichni osnovi dlya viboru ta otslnki perspektivnih sistem elektromehanlchnogo peretvorennya energiyi elektroruhomogo skladu.* – *DisertatsIya na zdobuttya naukovogo stupenya doktora tehnlchnih nauk za spetsIalnIstyu 05.22.09.* -

«Elek-trotransport». Natsionalniy tehniichniy universitet «Harkivskiy politehniichniy Institut». Harkiv, - 2014. 368s. 2. Lyubarskiy B.G. Optimizatsiya rezhimov raboty tyagovogo asinhronnogo privoda / B.G. Lyubarskiy // *Elektrika. Kursk*– 2014 – #6 –S5–10. 3. V.I. Omelyanenko, B.G. Lyubarskiy, E.S. Ryabov, A.V. Demidov, T.V. Glebova. Analiz i sravnenie perspektivnykh tyagovykh elektrodvigateley // *Zaluzhniy transport Ukraini*.– 2008. – #2/1. – S. 26–31. 4. V.I. Omelyanenko, B.G. Lyubarskiy, Ryabov E. S, A. V Demidov, T. V. Glebova Elektrodvigateli dlya perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava // *Lokomotiv-Inform*. – 2008. – #1. – S. 16–19. 5. Elektropodvizhnoy sostav s asinhronnyimi tyagovymi dvigatelyami/ N A. Rotanov, A. S. Kurbasov, Yu.G. Byikov, V. V Litovchenko ; pod red. Rotanova N. A. – M.: Transport, 1991. – 336 s. 6. Kolpachyan P.G. Adaptivnoye upravlenie asinhronnyim tyagovym privodom magistralnykh elektrovozov . – Rostov n/D: Izd-vo zhurn. «Izv. vuzov. Sev.-Kavk. regiona», 2006. – 131 s. 7. Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M. Elektricheskie mashiny. Chast 2 Mashiny peremennogo toka Izd 3 pererab, Leningrad, Energiya, 1973, 648s. 8. Severin V. P., Nikulina E. N. Metody odnomernogo poiska. - Harkov. : NTU HPI, 2013. – 124 s. 9. Himmelblau D. Prikladnoye nelineynoye programmirovaniye: Per. s angl. – M.: Mir, 1975. – 534 s. 10. Nahodkin M.D.(red) Proektirovaniye tyagovykh elektricheskikh mashin Uchebnoye posobie dlya vuzov zh.-d. transporta, Izd. 2, pererab. i dopoln. M.: Transport, 1976, 624 s. 11. General Considerations for IGBT and IPM. Mitsubishi Application Notes.[http:// www.mitsubishielectric.com/semiconductors/files/manuals/powermos3_0.pdf](http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/files/manuals/powermos3_0.pdf) . 12. Vyibor i raschet silovykh poluprovodnikovyykh priborov poluprovodnikovogo preobrazovatelya elektricheskoy energii : ucheb.metod. posobie / V.V. Ivahno, V.V. Zamaruev, O.V. Ilina. – H.: NTU «HPI», 2014. – s. 72. 13. BILT.652433.004PS. Elektrodvigatel asinhronnyiy tyagoviy tipa AD914U1. Pasport.

Петренко О.М., Доманський І.В., Любарський Б.Г.

МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДУ РУХОМОГО СКЛАДУ

Розроблено методику визначення режимів роботи асинхронного тягового приводу на основі рішення задачі багатокритеріальної оптимізації. Обрано вектор параметрів, що складається з наступних компонентів: режим роботи приводу, коефіцієнт модуляції та ковзання. Критерієм ефективності приводу обраний ККД приводу. Визначено обмеження у вигляді нерівностей та рівності.

Петренко А.Н., Доманский И., Любарский Б.Г.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Разработана методика определения режимов работы асинхронного тягового привода на основе решения задачи многокритериальной оптимизации. Избран вектор параметров, состоящий из следующих компонентов: режим работы привода, коэффициент модуляции и скольжения. Критерием эффективности привода избран КПД привода. Определены ограничения в виде неравенств и равенства.

Petrenko A.N., Domanski I.V., Liubarskiy B.G.

METHOD OPTIMIZATION WORK OF ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE ROLLING STOCK

The method of determining the mode of asynchronous traction in the water-based solution of multi-objective optimization. Chosen parameter vector consisting of the following components: drive mode, modulation factor and sliding. The criterion of effectiveness over efficiency of the selected drive. Defined constraints as inequalities and equality.