

Н.І. Кульбашна, В.Х. Далека, О.О. Кульбашний

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВАГОНІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

В статті розглядається питання підвищення енергоефективності електроприводів вагонів метрополітену за рахунок застосування перетворювача частоти на підставі скалярного керування. Основною проблемою такого керування є забезпечення сталої роботи двигуна у разі малих частот обертання ротора, коли зростає вплив активного опору обмотки статора. Тому запропоновано введення в систему керування електроприводу ІR-компенсації, що вирішує цю проблему та є перспективним напрямом удосконалення електроприводів.

Ключові слова: енергоефективність, асинхронний електродвигун, метрополітен, електропривод, скалярне керування, ІR-компенсація.

Постановка проблеми

Вирішення актуальних питань проблеми ресурсозбереження на транспорті потребує подальших наукових досліджень з підвищення рівня енергоефективності тягових електроприводів рухомого складу. Особливо збільшилась кількість наукових публікацій та їхня цінність в останні роки. Вирішення питань енергоефективності проводиться в напрямках як удосконалення тягових електродвигунів так і їхніх систем керування.

Розвиток електроніки надав можливості вдосконалювати систему тягового електроприводу і використовувати на рухомому складі асинхронні та вентильні тягові електричні двигуни, які мають ряд переваг перед тяговими електродвигунами постійного струму.

Для електродвигунів, що працюють від перетворювача частоти, енергоефективність багато в чому залежить від обраного способу керування. У разі правильно підбраного способу керування електродвигуном можливе отримання максимального коефіцієнта корисної дії і крутного моменту на валу двигуна. Повне використання можливостей електродвигуна підвищує загальну продуктивність електричної машини. Тому підвищення рівня енергоефективності електроприводів за рахунок раціонального вибору методів регулювання електродвигунами, зокрема вагонів метрополітену, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На цей час значна кількість досліджень пов'язана з вдосконаленням роботи електроприводів метрополітену. Так у роботі [1] розглянуто керування тяговою системою метрополітену, яка

забезпечується двома послідовно з'єднаними двигунами постійного струму. Але для сучасних конструкцій електрообладнання, коли створюється перехід до впровадження асинхронних двигунів на вагонах метрополітену, цей підхід не є актуальним. У роботі [2] побудовано імітаційну модель сучасного тягового електроприводу вагонів метрополітену з векторною системою керування асинхронним електроприводом, але питання в цій роботі стосуються підвищення тягових властивостей вагону для різних коефіцієнтів зчеплення.

Вдосконалення системи регулювання асинхронного двигуна в різних промислових сферах є найбільш розвиненою базою наукових досліджень. Вивчення цього питання розкриває можливості інтегрування розроблених методик до конкретної сфери застосування, а саме вагонів метрополітену.

У роботі [3], як і в багатьох інших, розглянуті сучасні системи керування асинхронними електроприводами, які застосовують два головні методи частотного керування: скалярне та векторне, які дають змогу регулювати швидкість та момент в електроприводі.

Особливостями підходів до керування є не тільки підбір методу керування, а й відповідного застосованого алгоритму.

Використання перетворювача частоти, який змінює частоту обертання ротора двигуна за рахунок зміни частоти та амплітуди напруги живлення, як загальноприйнятий метод регулювання двигуна, показано у роботі [4]. Перевага в цій роботі надається застосуванню перетворювачів частоти на IGBT-транзисторах.

У роботі [5] зрівнюються скалярне та векторне керування вихідним перетворювачем із урахуванням несиметричності режимів роботи. За результатами

моделювання для аварійних режимів роботи показані переваги видів керування за певними характеристиками.

Звісно, що існують деякі суперечливі висновки у дослідженнях стосовно переваг скалярного або векторного керування.

У роботі [6] для керування швидкістю та моментом асинхронного приводу перевага надається системам векторного керування. У роботі [7] запропоновано використати бездатчикового керування (без виміру швидкості та потокозчеплення) і новий алгоритм, а саме синтезований спостерігач, що точно оцінює в реальному часі опір ротора за наявності інжекції малого гармонійного сигналу в намагнічуваній складовій статорного струму асинхронного двигуна. Подібним є дослідження [8], в якому паралельно (відокремлено) оцінюється опір статора та швидкість ротора в приводі асинхронного двигуна без датчика швидкості. Застосований спостерігач для визначення струму статора, потоку ротора та закон керування з використанням теореми про стійкість Ляпунова для оцінки швидкості ротора.

Скалярні системи керування не втратили свого значення завдяки простоті реалізації і налаштування. Вони до сих пір є широко розповсюдженими і реалізуються в усіх сучасних перетворювачах як базова структура системи керування і знаходять застосування в різних сферах промисловості і транспорту.

У роботі [9] розглянуто структуру модернізованої системи частотного регулювання та методику розрахунку законів керування асинхронними електроприводами у статичних та динамічних умовах. Досліджено процеси у стандартній та модернізованій скалярній системі керування.

У роботі [10] для розширення діапазону регулювання швидкості двигуна застосована система скалярного керування і алгоритм керування напругою статора шляхом організації вольтодобавки для збільшення перевантажувальної здатності двигуна на низьких частотах керування.

У роботі [11] синтезовано новий алгоритм, який забезпечує експоненціальну ідентифікацію активних опорів статора та ротора асинхронного двигуна на базі інформації про струм статора, напругу та кутову швидкість ротора. Запропонований алгоритм оцінює потокозчеплення ротора, адаптованого до змінювання опорів статора та ротора.

У роботі [12] розглянуто підвищення енергоефективності асинхронних частотно-керованих асинхронних електроприводів із скалярними розімкнутими системами керування зі застосуванням спеціальних законів керування на

базі рівнянь статичного і динамічного двигуна, закону з початковою намагніченістю двигуна низькочастотним двигуном. Визначено оптимальні діапазони для зменшення втрат в двигуні.

Однією з функцій перетворювачів, що потребують подальшого дослідження, є так звана «IR-компенсація», яка дає змогу підвищити пусковий момент за рахунок компенсації падіння напруги на активному опорі статора асинхронного електродвигуна. У роботі [13] IR-компенсація застосована в імітаційній моделі розімкнутої системи «перетворювач частоти - асинхронний двигун» для системи охолодження контролером машинного відділення судна.

Отже наведені наукові дослідження розглядають методи і заходи підвищення енергоефективності електричних машин, які керовані частотним перетворювачем із застосуванням векторного і скалярного керування на підставі різноманітних алгоритмів. Але вони належать до загальноприйнятих у промислових сферах питань підвищення енергоефективності приводів. Що стосується питань вдосконалення систем керування двигунами вагонів метрополітену, який на сучасному етапі має важливу роль в перевезеннях пасажирів, то вони набувають найбільшої актуальності і потребують подальшого вивчення.

Формулювання мети статті

Тому метою роботи є оцінка роботи приводу метрополітену із застосуванням перетворювача частоти на підставі скалярного керування, що забезпечить відповідний рівень ресурсозбереження під час експлуатації вагонів метрополітену.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- 1) оцінити роботу електродвигуна вагону метрополітену за механічними характеристиками;
- 2) оцінити роботу електродвигуна вагону метрополітену із скалярною системою регулювання до і після введення IR-компенсації.

Викладення загального матеріалу

Для оцінювання параметрів асинхронного електроприводу використана схема заміщення асинхронної машини, відповідно до [14], яка придатна для аналізу як сталих, так і перехідних режимів роботи для будь-якої керуючої частоти напруги живлення статора (рис. 1).

На рис. 1 позначено: r_1 – активний опір статору; x_1 – реактивний опір статору; I_1 – струм статору; I_2 – струм ротору; r_2 – активний опір ротору; x_2 – реактивний опір; r_m – активний опір кола намагнічування; x_m – реактивний опір кола намагнічування.

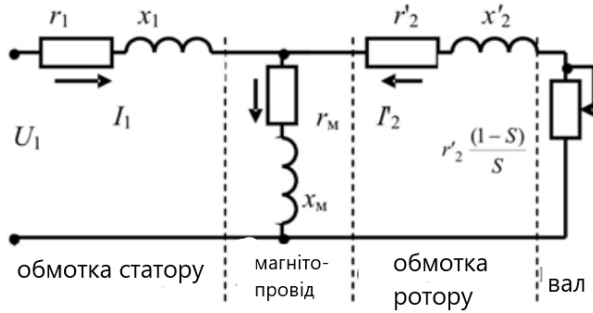


Рис. 1. Схема Т-заміщення асинхронного електроприводу

Для дослідження використані параметри тягового асинхронного двигуна потужністю 180 кВт типу STDa 280-4В-УК виробництва компанії ЕМІТ Cantoni Motors (Польща), які встановлені на вагонах метрополітену серії 81-7036/7037. Були розраховані параметри схеми Т-заміщення асинхронного електроприводу, які наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові параметри схеми Т-заміщення тягового асинхронного двигуна

r_1 , Ом	x_1 , Ом	I_1 , А	r_2 , Ом	x_2 , Ом	I_2 , А	$x_M + r_M$, Ом
0,0522	0,135	148,4	0,0372	0,183	165,3	34,6

На рис. 2 наведено відповідну векторну діаграму асинхронного двигуна.

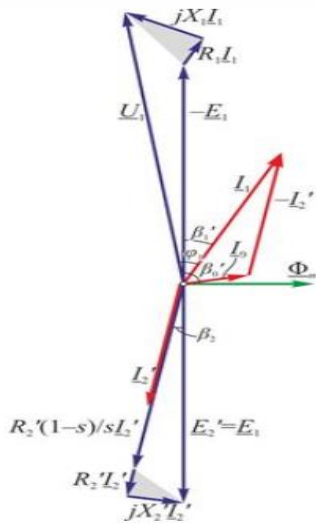


Рис. 2. Векторна діаграма асинхронного двигуна

На рис. 2 позначені такі вектори: Φ – вектор магнітного потоку; I_1 – вектор току статора; I_2 – вектор току ротора; E_1 – вектор ЕРС кола ротора; E_2 – вектор приведеної ЕРС кола статора; U – вектор напруги; $I_1 r_1$ – вектор падіння напруги на активному опорі статора; $jI_1 x_1$ – вектор падіння

напруги на реактивному опорі статора; r_2'/S – вектор падіння напруги на активному опорі ротору; x_2' – вектор падіння напруги на реактивному опорі ротору.

Числові значення векторів наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Числові значення векторів

I_1 , А	I_2 , А	E_1 , В	E_2 , В	U , В	$I_1 r_1$, А	$jI_1 x_1$, А	r_2'/S , А	x_2' , А
148,4	165,3	500	486	500	4,676	8,736	1,69	0,411

Для аналізу роботи асинхронного двигуна використана механічна характеристика $M = f(s)$ у разі постійних значень $U_1 = const$ і $f_1 = const$. Її побудовання створювалося за рівнянням [14]:

$$M = \frac{2M_K(1 + as_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2as_K}, \quad (1)$$

де M_K – максимальний момент асинхронного двигуна; s_K – критичне ковзання; a – коефіцієнт, який характеризує відношення опору обмотки статора до опору обмотки ротора $\frac{R_1}{R_2}$.

За допомогою обчислених даних були побудовані механічні характеристики $M = f(s)$, які наведені на рис. 3.

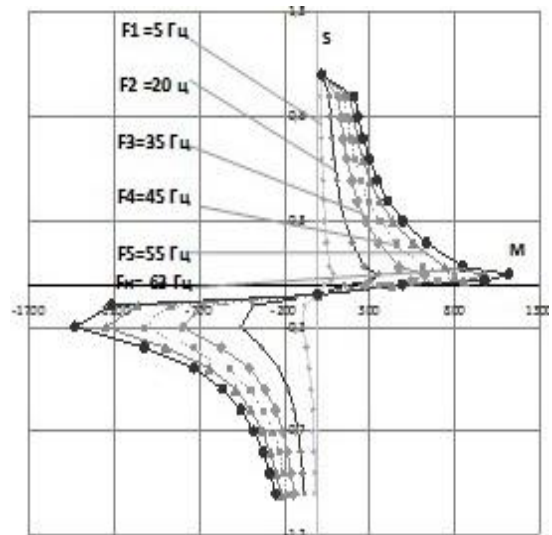


Рис. 3. Механічні характеристики асинхронного двигуна під час керування за законом $U_1/F_1 = const$

З рис. 3 видно, що момент досягає максимуму (критичного значення) у разі деякого ковзання $s_K = 0,088$. Форма кривої $M = f(s)$ вказує на те, що асинхронний двигун може стійко працювати тільки в діапазоні ковзань від $s = 0$ до $s = s_K$, коли момент

збільшується з ковзанням від $M = 0$ до $M = M_{max}$. Після перевищення критичного ковзання момент зменшиться і двигун неминуче повинен зупинитися. Отже, асинхронний двигун має межу за навантаженням, що визначає максимум обертового моменту.

Теоретично доведено, що неможливо одночасно забезпечити задовільні механічні та енергетичні характеристики в широкому діапазоні швидкостей і змінювання навантаження. Головна причина цього – зростання впливу активного опору обмотки статора у разі зниження частоти напруги живлення. Особливе значення ця проблема набуває під час моментних навантажень, які змінюються в межах номінального значення і діапазоні регулювання швидкості більш ніж 1:50. А саме, під час роботи асинхронного двигуна з малими значеннями керуючої частоти, відбуватися значне падіння напруги на індуктивному опорі статора, що є негативним фактором для ефективності та економічності електропривода.

Скалярне керування не компенсує «провали» швидкості під навантаженням, причому значення «провалу» ($\Delta\omega$) залежить від частоти напруги живлення, також різні значення струму статора під навантаженням (I_n) і час перехідного процесу.

Дослідження свідчать [14], що ефективним рішенням є введення в систему керування електроприводу так званої IR-компенсації. У разі малих частот і малих напруг на асинхронному двигуні зростає роль падіння напруги на активному опорі статора. Якщо знижувати напругу чітко пропорційно частоті, то це призведе до зменшення магнітного потоку електродвигуна. Тому в частотному приводі напруга повинна знижуватися менше, ніж за умови $U_1 / f_1 = \text{const}$. Для цього застосовують систему IR-компенсації, в якій цей закон регулювання замінений на співвідношення:

$$\frac{U_1 + I_1 \cdot R_1}{f_1} = \text{const}, \quad (2)$$

де U_1 – керуюча фазна напруга; I_1 – струм статора; R_1 – опір статора; f_1 – керуюча частота.

IR-компенсація – позитивний зворотний зв'язок за струмом статора, діючий в каналі напруги. Це дає змогу компенсувати зменшення потокозчеплення і моменту двигуна, що виникає в наслідок падіння напруги на статорі, створюване струмом I_1 на активному опорі R_1 в результаті збільшення навантаження.

У приводах, в яких застосована компенсація падіння напруги на опорі статора, підтримується постійне співвідношення між частотою і напругою за залежністю (2). Ця напруга відрізняється від

напруги, що подається на статор електродвигуна, на величину падіння напруги на активному опорі статора. Механічна характеристика асинхронного двигуна з частотним керуванням за формулою (2) приведено на рис. 4.

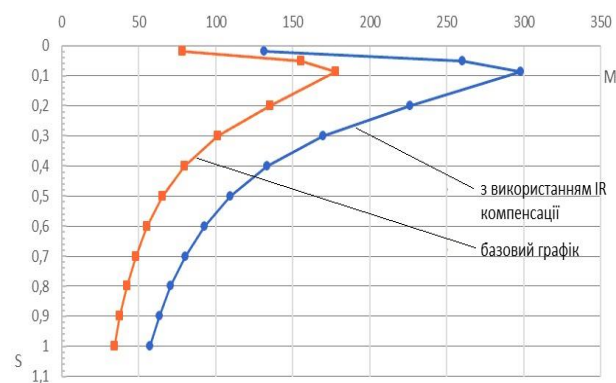


Рис. 4. Механічні характеристики асинхронного двигуна для керування за законом $(U_1 + I_1 \cdot R_1) / f_1 = \text{const}$ з керуючою частотою $F_2 = 40$ Гц із використанням IR-компенсації

Аналіз рис. 4 показує, що у разі малих значень керуючої частоти виникає падіння електромагнітного моменту через зростання впливу активного опору обмотки статора під час зниження частоти напруги живлення. Демонстрація ефекту введення в систему керування електроприводу IR-компенсації показана на рис. 4. Такий підхід є перспективним напрямом удосконалення електроприводів, так як значно збільшується значення електромагнітного моменту у разі малої частоти керування.

Висновки

Отже, досліджено використання частотно-керованого привода із скалярною системою керування асинхронним електричним двигуном вагону метрополітену. Запропоноване рішення підвищує енергоефективність електричних машин і загалом усього метрополітену. На підставі механічних характеристик двигуна встановлено, що асинхронний двигун може стійко працювати тільки в обмеженому діапазоні ковзань, коли момент досягає максимального значення. Для вирішення цієї проблеми запропоновано введення в систему керування електроприводу IR-компенсації. За порівнянням механічних характеристик до та після її введення в систему керування зроблено висновок, що застосування IR-компенсації є перспективним напрямом удосконалення електроприводів, так як значно збільшується значення електромагнітного моменту у разі малої частоти керування. Подальші дослідження націлені на створення імітаційної моделі двигуна з IR-компенсацією.

Література

1. Silva L. I., Bouscayrol A., De Angelo C. H., Delarue P. and Verhille J. N. A Novel Approach for Simulating the Control of the Traction System of an Automatic Subway. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2014. P. 1 – 6.
2. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction / Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. P. 48 – 57.
3. Методи управління та апаратна реалізація сучасних перетворювачів частоти / С. О. Квітка, Л.М. Безменнікова, О. Ю. Вовк, О. С. Квітка // *Праці Таврійського державного агротехнологічного унів-ту. Мелітополь*, 2013. Вип. 3, т. 2. С. 164 – 171.
4. Кононов Б. Т. Система керування частотно-регульованим електроприводом на базі асинхронного електричного двигуна. / Б.Т. Кононов, А.О. Нечаус, Н.М. Рябуха // *Збірник наукових праць. Харків. ун-ту повітряних сил*, 2014. 3(40). С. 136 –140.
5. Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive / S. Goolak, V. Tkachenko, P. Št'astniak, S. Sapronova and B. Liubarskyi // *Symmetry*, 2022, 14, 150.
6. Сайидов М. К. Исследование эффективности применения системы управления асинхронного электропривода. / М.К. Сайидов, З.И. Жумаев, Х.Ш. Муродов, Д.Ш. Мардоннов // *Наука, техника и образование*, 2020. С. 62 – 67.
7. Попапенко Е. М. Оценка сопротивления ротора с использованием инжекции при высокоточном векторном управлении асинхронным приводом. / Е.М. Попапенко, Е.В. Душинова, В.И. Левыкина, Е.В. Васильева // *Електротехніка і електроенергетика*, 2009. № 2. С. 37 – 42.
8. Heidari H., Rassölkin A., Holakooie M. H., (...), Belahcen A., Lukichev D. V. A parallel estimation system of stator resistance and rotor speed for active disturbance rejection control of six-phase induction motor., 2020. 13(5), 1121.
9. Shreiner R. T., Shilin S.I., Kostylev A.V., Khabarov A.I. Optimization of a variable-frequency induction motor drive with a scalar control system. *Russian Electrical Engineering*, 83(9), 2012. P. 490 – 493.
10. Панов С. И. Совершенствование скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода с улучшенными динамическими характеристиками. / С.И. Панов, В.И. Рубцов // *Международный научный журнал «Символ науки»*. № 05. 2017. С. 41 – 48.
11. Peresada S. M., Konoplynskiy M. A. Active resistance identification of an induction motor using an adaptive flux observer. *Technical Electrodynamics*, 2013. 1. P. 40 – 48.
12. Braslavskii I. Y., Kostylev A. V., Tsibanov D.V., Khabarov A. I. Dynamic-process optimization in an asynchronous electric drive with a scalar automatic control system. *Russian Electrical Engineering*, 2014. 85(9). P. 575 – 580.
13. Bezv D. V., Payuk L. A., Voronina N. A. The Controlled Electric Drive of the Automatic Cooling System of the Engine Room on a Vessel. *MATEC Web of Conferences*, 2016. 91, 01037.
14. Видмиш А. А. Основы электропривода. Теория та практика. Частина 1. Навчальний посібник. / А.А. Видмиш, Л.В. Ярошенко. - Вінниця: ВНАУ, 2020. 387 с.
- Subway 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1 – 6.
2. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. (2019). Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 48-57.
3. Kvitka S., Bezmennikova L., Vovk O., Kvitka O. (2013). Control methods and hardware implementation of modern frequency converters. *Proceedings of the Tavri State Agro-Technological University. Melitopol*. Vol. 3, (2), 164 – 171.
4. Kononov B., Nechaus A., Ryabukha N. (2014) Control system of a frequency-regulated electric drive based on an asynchronous electric motor. *Collection of scientific papers of the Kharkiv Air Force University*, 3(40), 136-140.
5. Goolak S., Tkachenko V., Št'astniak P., Sapronova S. and Liubarskyi B. (2022) Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive. *Symmetry*, 14, 150.
6. Saidov M., Zhumaev Z., Murodov Kh., Mardonov D. (2020). Study of the effectiveness of the application of the control system of an asynchronous electric drive. *Science, technology and education*. 62-67.
7. Potapenko E., Dushinova E., Levykina V., Vasilyeva E. (2009). Estimation of rotor resistance using injection for high-precision vector control of an asynchronous drive. *Electrical engineering and power engineering*, 2, 37 - 42.
8. Heidari H., Rassölkin A., Holakooie M. H., (...), Belahcen A., Lukichev D. V. (2020). A parallel estimation system of stator resistance and rotor speed for active disturbance rejection control of six-phase induction motor. *Energies*, 13(5), 1121.
9. Shreiner R., Shilin S., Kostylev A., Khabarov A. (2012). Optimization of a variable-frequency induction motor drive with a scalar control system. *Russian Electrical Engineering*, 83(9), 490 – 493.
10. Panov S., Rubtsov V. (2017). Improvement of scalar control of a frequency-controlled asynchronous electric drive with improved dynamic characteristics. *International scientific journal "Symbol of Science"*, No. 05, 41 – 48.
11. Peresada S., Konoplynskiy M. (2013). Active resistance identification of an induction motor using an adaptive flux observer. *Technical Electrodynamics*, 1, 40 – 48.
12. Braslavskii I., Kostylev A., Tsibanov D., Khabarov A. (2014). Dynamic-process optimization in an asynchronous electric drive with a scalar automatic control system. *Russian Electrical Engineering*, 85(9), 575 – 580.
13. Bezv D., Payuk L., Voronina N. (2016). The Controlled Electric Drive of the Automatic Cooling System of the Engine Room on a Vessel. *MATEC Web of Conferences*, 91, 01037.
14. Vydmysh A., Yaroshenko L. (2020). Basics of an electric drive. Theory and practice. Part 1. Study guide. VNAU, 387.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Т. Доманський, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: КУЛЬБАШНА Надія Іванівна
кандидат технічних наук., старший викладач
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – kulbakanadia810@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1551-1500>

Автор: ДАЛЕКА Василь Хомич
доктор технічних наук., професор
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – dalekavf@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3074-5500>

Автор: КУЛЬБАШНИЙ Олексій Олександрович
випускник магістерського рівня
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – skywar989@gmail.com

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC DRIVES OF SUBWAY CARS

N. Kulbashna, V. Daleka, O. Kulbashnyi

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article proposes the use of a frequency-controlled drive for regulating asynchronous electric motors used on subway cars. The proposed solution creates all the grounds for increasing the energy efficiency of electric cars and, in general, the entire metro. Taking into account that the subway is one of the most used types of urban transport in large cities of Ukraine and at the same time consumes a significant part of electricity, therefore, in the conditions of rising prices for energy resources, these issues become the most urgent. It is shown that the methods of regulation of subway engines are not covered widely enough in scientific research, but the methods of increasing the energy efficiency of drives generally accepted in industrial spheres are a developed direction. This reveals the possibilities of integrating the developed methods for application on subway cars. The use of a frequency converter, which changes the frequency of rotation of the motor rotor by changing the frequency and amplitude of the supply voltage using vector and scalar control, is a generally accepted method of motor regulation. There are a number of conflicting findings in research regarding the use of scalar or vector control, with some favoring the induction vector control system. However, a clear regulation is not required to regulate the operation of metro engines. Therefore, the article considers scalar control, which has not lost its importance due to the ease of implementation and adjustment and is used in various areas of industry and transport. The parameters of the STDa 280-4B-UK type STDa 280-4B-UK traction asynchronous traction motor with a capacity of 180 kW, manufactured by the EMIT Cantoni Motors company, which are installed on subway cars of the 81-7036/7037 series, were used for the study. The parameters of the T-substitution scheme of the asynchronous electric drive and the numerical values of the vectors of the asynchronous motor were calculated. To analyze the operation of an asynchronous motor, the article uses the mechanical characteristic of the dependence of the motor torque on slippage at certain frequency values. It has been established that an asynchronous motor can operate stably only in a limited slip range, when the moment reaches its maximum value and the motor stops, as it has a load limit. The main reason for this is the increase in the influence of the active resistance of the stator winding when the supply voltage frequency decreases. The solution to this problem is the introduction of IR-compensation into the control system of the electric drive, which provides positive feedback on the stator current acting in the voltage channel. To demonstrate the effect of IR compensation, a comparison of mechanical characteristics was made before and after its introduction into the control system. Therefore, it was proved that the application of IR compensation is a promising direction of work, as the value of the electromagnetic moment increases significantly in the case of a low control frequency.

Keywords: energy efficiency, asynchronous electric motor, subway, electric drive, scalar control, IR compensation.