

УДК 629.429.3:621.313

О.М. ПЕТРЕНКО¹ (ХНУМГ), Б.Г. ЛЮБАРСЬКИЙ² (НТУ «ХП»), Є.С. РЯБОВ³
(«ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»)¹Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, кандидат технічних наук, доцент, тел.: 095 688 27 16, ел. пошта: petersanya2007@mail.ru²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, доктор технічних наук, професор, тел.: 067 993 75 69, ел. пошта: lboris19111972@mail.ru³Державне підприємство завод «Електроважмаш», Харків, кандидат технічних наук, завідувач сектором, тел.: 097 302 14 54

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА НА РЕЖИМИ РОБОТИ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ

Вступ та постановка проблеми

У сучасному тяговому приводі для живлення асинхронного тягового двигуна (АТД) застосовуються два режиму роботи автономного інвертору напруги (АІН) – режим однократної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), при великих швидкостях обертання та просторово-векторної ШІМ, при пуску та малих швидкостях. 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. Слід зазначити що енергія, яка перетворюється електрорухоми́м складом, протягом перетворення проходить шлях, що визначається, в першу чергу, структурою тягового приводу. На режими роботи кожній з ланок тягового приводу впливають різні фактори. Так, наприклад, на режими роботи вхідного перетворювача впливають в першу чергу процеси у тяговій мережі, на механічну частину тягового приводу – режими руху електрорухоми́го складу (ЕРС) на ділянці колії (швидкість руху та сила тяги). Режими роботи АТД та вихідного перетворювача визначаються режимами роботи ЕРС – параметрами руху ЕРС, а також режимами роботи тягового приводу. На відміну від тягового приводу на основі колекторних тягових двигунів, тяговий привод на основі АТД з АІН може працювати в одній і той же точці тягової характеристики (частоти обертання та моменту) з різним рівнем втрат у елементах приводу. Тому задачу визначення оптимальних режимів роботи тягового приводу можливо звести до визначення оптимальних режимів роботи ланки АТД – АІН з урахуванням обмежень, що встановлюються на роботу механічної частини тягово-

го приводу (обмеження по зчепленню та швидкості).

Літературний огляд

У роботах [1-9] зазначається, що тяговий привод (ТП) електрорухоми́го складу може працювати у режимах:

- максимальної тяги або гальмування – режим максимального моменту АТД;
- підтримання заданої швидкості руху – режим максимального ККД АТД;
- вибіг або механічне гальмування – режим холостого ходу АТД.

Для кожного з цих режимів перехід з режиму роботи АІН з однократної ШІМ до просторово-векторної проходить при різних частотах обертання. У роботах [1-3] зазначається значний вплив температури обмоток АТД на режими роботи ТП та на його ефективність. У роботі [4] обумовлені загальні підходи по визначенню ефективності тягового приводу. У роботах [1-3] зазначено, що температура обмоток АТД суттєво впливає на режими роботи ТП. Таким чином, ідентифікація режимів роботи АІН в залежності від температури ТД є актуальною науковою задачею.

Мета статті

Розробка методики визначення залежності зміни режиму роботи автономного інвертору напруги з режиму просторово-векторної до однократної широтно-імпульсної модуляції від температури обмоток тягового двигуна.

Основний матеріал дослідження

За положеннями роботи [6] ефективність тягового приводу можливо навести у вигляді виразів:

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

де η_1 – ККД ланки АТД – 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_{nc} – 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 – АІН проводиться на основі підходів запропонованих у роботах [1,2,7] що включають в себе наступне: для вирішення задачі визначення оптимальних режимів роботи ТП 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 ШІМ. Режим розгону та режим рекуперативного гальмування схожі між собою. Застосуємо метод векторних цільових функцій запропонований в роботі [10]. У якості цільової функції для режиму розгону оберемо векторну функцію з наступними параметрами:

$$F_{c1} = \begin{bmatrix} 1 - \eta_1 \rightarrow \min, \\ -F_d \rightarrow \min, \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

Для режиму рекуперативного гальмування векторна цільова функція має вигляд:

$$F_{c5} = \begin{bmatrix} 1 - \eta_1 \rightarrow \min, \\ F_d \rightarrow \min, \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

$$F_{c3} = F_{c4} = 1 - \eta_1 \rightarrow \min. \quad (4)$$

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

Вектор параметрів для вирішення задачі для режиму просторово-векторного ШІМ має вигляд:

$$X_{PV} = \begin{bmatrix} s \\ K_m \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де s – ковзання АТД, K_m – коефіцієнт модуляції АІН,

а для режиму однократної ШІМ має скалярний вигляд

$$X_O = s \quad (6)$$

Таким чином визначені параметри умовної оптимізації режимів роботи ТП при застосуванні просторово-векторної та однократної ШІМ.

Для вирішення задачі оптимізації використаний пакет *optlab* для *MATLAB* розроблений в НТУ «ХП» [10,11], який дозволяє легко варіювати різними методами рішення задач оптимізації. Як показали рішення тестових завдань, широко використовуваним методом багатогранника, що деформується результат рішення сильно залежить від стартової точки. Досягнення бажаної величини сили лінійного двигуна можливо при різних поєднаннях геометричних розмірів. Можливі випадки, коли рішення взагалі не може бути знайдене. Це говорить про множини локальних мінімумів, тобто про те, що цільова функція – багатоекстремальна. Тому оператори оптимізаційної процедури повинні містити разом з детермінованими і стохастичні компоненти, здатні оживити пошуковий процес при завмиранні його в локальних мінімумах рельєфу цільової функції. Одним з таких методів оптимізації є метод, що використовує генетичні алгоритми [10-13].

Генетичним алгоритмам властивий один недолік – вони знаходять оптимальне рішення з ма-

лою точністю. Для виключення цього недоліку в [12] запропонований комбінований генетичний алгоритм, який в завершальній стадії пошуку використовує локальні методи оптимізації, зокрема, метод Нелдера - Міда [11]. Такий підхід підвищує ефективність пошуку і уточнює глобальний мінімум.

Результати досліджень для тягового приводу трамвая Татра ТЗВПА з асинхронним тяговим двигуном АД 931 наведено на рис. 1.

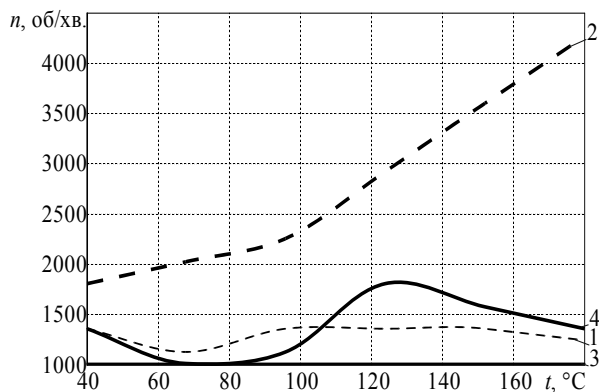


Рис. 1. Точка переходу тягового приводу трамвая з режиму просторово-векторної до однократної ШІМ при режимах $U_{op} = 1$ - розгін трамвая; 2 - $U_{op} = 2$ - тяга при підтриманні заданої швидкості руху; 3 - $U_{op} = 3$ - гальмування при підтриманні заданої швидкості руху; 4 - $U_{op} = 5$ - електричне гальмування

В режимі розгону рухомого складу $U_{op} = 1$ (див. рис. 1), цей перехід здійснюється на частоті обертання близько 1125...1350 об/хв., і незначно змінюється від температури обмоток двигуна. Перехід при рекупераційному гальмуванні ($U_{op} = 5$) здійснюється при більших значеннях частот обертання 1013...1800 об/хв. При збільшенні температури частота обертів точки переходу у трамвая зростає до 1800 об/хв. при темпера-

турі обмоток близько 120 °С, а потім зменшується до 1350 об/хв. при температурі 180 °С.

Висновки.

1. Розроблено методику визначення залежності зміни режиму роботи автономного інвертору напруги від температури обмоток тягового двигуна, яка основана на визначенні ефективності тягового приводу. Особливістю методики є визначення ККД приводу за результатами вирішення задачі оптимізації параметрів тягового приводу з застосуванням комбінованого методу пошуку на базі генетичного алгоритму та методу Нелдера - Міда.

2. Запропоновані цільові функції для визначення ефективності приводу які дозволяють визначити оптимальні режими тягового приводу при застосуванні різних режимів ШІМ. Для режимів розгону та гальмування запропоновано застосування векторної цільової функції з компонентами, що обумовлюють ККД та силу тяги, а для режиму підтримання швидкості руху скалярна функція, яка обумовлена ККД приводу.

3. В якості параметрів для режиму просторово-векторної ШІМ обрано вектор зі складовими ковзання та коефіцієнту модуляції, а для однократної ШІМ - ковзання.

4. Встановлено, що у режимі розгону трамвая Татра ТЗВПА з асинхронним тяговим двигуном АД 931, перехід з режиму просторово-векторної до однократної ШІМ здійснюється на частоті обертання близько 1125...1350 об/хв. і незначно змінюється від температури обмоток двигуна. Перехід при рекупераційному гальмуванні здійснюється при більших значеннях частот обертання 1013...1800 об/хв. При збільшенні температури частота обертів точки переходу у трамвая зростає до 1800 об/хв. при температурі обмоток близько 120 °С, а потім зменшується до 1350 об/хв. при температурі 180 °С.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Любарский, Б. Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу: дис. на здобуття наукового ступеня д. т. н. за спец. 05.22.09 «Електротранспорт» / Б. Г. Любарский; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - Х., 2014. - 368 с.
2. Любарский, Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового асинхронного привода / Б.Г. Любарский // *Электрика*. - 2014 - №6. - С. 5-10.
3. 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

REFERENCES

1. Lyubarskiy B. G. *Teoretychni osnovy dlya vyboru ta otsinky perspektyvnykh system elektromekhanichnoho peretvorennya enerhiyi elektrorukhomoho skladu*. Dokt., Diss. [The theoretical basis for the selection and evaluation of promising systems of Electromechanical energy conversion electric rolling stock. Doct. Diss.]. Kharkiv, 2014. 368 p.
2. Lyubarskiy B. G. Optimizatsiya rezhimov raboty tyagovogo asinkhronnogo privoda [Optimization of operation modes of asynchronous traction drive]. *Elektrika - Electrics*, 2014, no. 6, pp. 5-10.
3. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G. Matematychna model' optymal'noho keruvannya rukhom elektromekhanichnoho skladu na pidstavi vyryshennya rivnyan' Hamil'tona-Yakobi-Bellmana [Mathematical model of optimal motion control of electric rolling stock on the

ті. – 2016. - № 2. – С. 19-24

4. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов / Е.П. Блохин, А.Н. Пшибинько, Г.В. Евдомаха, В.В. Скалозуб // Залізничний транспорт України. - 2001. - № 6. - С. 19-22.

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

6. Петренко, О.М. Програмно-орієнтована математична модель руху транспортного засобу/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глебова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Х., 2016. - № 6(1178). – С. 89-95.

7. 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.

8. Петренко, О.М. Аналіз методів визначення енергетично оптимальних параметрів управління транспортних засобів / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Системи озброєння і військова техніка. — 2015. — № 4(44). — С. 96-100.

9. Петренко, О.М. Визначення чинників, що впливають на ефективність електричного транспортного засобу/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Системи обробки інформації. — 2015. — № 12(137). — С. 37-42.

10. Модели и методы оптимизации показателей качества систем автоматического управления энергоблока атомной электростанции: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.13.07 / В.П. Северин; Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". — Харків, 2007. — 35 с.

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

12. Рябов, Е.С. Синтез тягового реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, В.П. Северин, Е.С. Рябов В.Л. Емельянов // Электротехника і електромеханіка.– 2010. – №6. – С. 28–30.

13. Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 88 с.

Надійшла до друку 10.12.2016.

basis of the solution of the equations of Hamilton-Jacobi-Bellman]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti - Information management systems in railway transport*, 2016, no. 2, pp. 19-24.

4. Blokhin E.P., Pshin'ko A.N., Evdomakha G.V., Skalozub V.V. Vybor energeticheski optimal'nykh rezhimov vedeniya poezdov [The selection of energetically optimal modes of trains]. *Zaliznychnyy transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 2001, no. 6, pp. 19-22.

5. Dmitrienko V.D., Zakovorotnyy A.Yu. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov upravleniya dvizheniem dizel'-poezdov* [Modeling and optimization of the processes control the movement of diesel trains]. Kharkiv, NTMT Publ., 2013. 248 p.

6. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G., Hlyebova M.L. *Prohramno-oriyentovana matematychna model' rukhu transportnoho zasobu* [Software-oriented mathematical model of the vehicle]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut»* [Bulletin of National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"], 2016, no. 6 (1178), pp. 89-95.

7. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G. *Vyznachennya efektyvnosti elektrorukhomoho skladu. Osnovni polozhennya ta pidkhody* [Determination of the effectiveness of electric rolling stock. The main provisions and approaches]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti - Information management systems in railway transport*, 2015, no. 6, pp. 8-13.

8. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G. *Analiz metodiv vyznachennya enerhetychno optymal'nykh parametriv upravlinnya transportnykh zasobiv* [Analysis of methods for determining energy-optimal control parameters of vehicles]. *Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika - Weapons systems and military equipment*, 2015, no. 4(44), pp. 96-100.

9. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G. *Vyznachennya chynnykiv, shcho vplyvayut' na efektyvnist' elektrychnoho transportnoho zasobu* [Determination of factors affecting the efficiency of electric vehicles]. *Systemy obrobky informatsiyi - System of information processing*, 2015, no. 12(137), pp. 37-42.

10. Severyn V.P. *Modeli i metody optymizatsiyi pokaznykiv yakosti system avtomatychnoho upravlinnya enerhobloku atomnoyi elektrostansiyi*. Avtoreferat Diss. [Models and methods for optimization of quality parameters of automatic control systems of the nuclear power plant unit. Author's abstract]. Kharkiv, 2007, 35 p.

11. Severyn V.P., Nikulina E.N. *Metody odnomernogo poiska* [Methods of one-dimensional search]. Kharkiv, NTU KhPI Publ., 2013. 124 p.

12. Lyubarskiy B. G., Severyn V.P., Ryabov E.S., Emel'yanov V.L. *Sintez tyagovogo reaktivnogo induktornogo dvigatelya s aksial'nym magnitnym potokom dlya skorostnogo podvizhnogo sostava* [Synthesis of reactive traction induction motor with axial magnetic flux for high-speed rolling stock]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering and electromechanics*, 2010, no. 6, pp. 28 – 30.

13. Panchenko T. V. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. Astrakhan', Astrakhan University Publ., 2007. 88 p.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П.Д.*

Стаття присвячена розробці методики визначення залежності зміни режиму роботи автономного інвертору напруги від температури обмоток тягового двигуна, яка основана на визначенні ефективності тягово-го приводу. Особливістю методики є визначення ККД приводу за результатами вирішення задачі оптиміза-

ції параметрів тягового приводу з застосуванням комбінованого методу пошуку на базі генетичного алгоритму та методу Нелдера – Міда. Запропоновані цільові функції для визначення ефективності приводу які дозволяють визначити його оптимальні режими при застосування різних режимів ШІМ. Для режимів розгону та гальмування запропоновано застосування векторної цільової функції з компонентами, що обумовлюють ККД та силу тяги, а для режиму підтримання швидкості руху скалярна функція, яка обумовлена ККД приводу.

В якості параметрів для режиму просторово-векторної ШІМ обрано вектор зі складовими ковзання та коефіцієнту модуляції, а для однократної ШІМ – ковзання.

Ключові слова: асинхронний тяговий двигун; автономний інвертор напруги; широтно-імпульсна модуляція; оптимальні режими роботи; ККД тягового приводу; температура обмоток тягового двигуна.

УДК 629.429.3:621.313

А.Н. ПЕТРЕНКО¹ (ХНУГХ), Б.Г. ЛЮБАРСКИЙ² (НТУ «ХПИ»), Е.С. РЯБОВ³ (ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ)

¹Харківський національний університет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, Харьков, кандидат технических наук, доцент, тел.: 095 688 27 16, эл. почта: petersanya2007@mail.ru

²Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, доктор технических наук, профессор, тел.: 067 993 75 69, эл. почта: lboris19111972@mail.ru

³Государственное предприятие завод «Электротяжмаш», Харьков, кандидат технических наук, заведующий сектором, тел.: 097302 14 54

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РЕЖИМ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Статья посвящена разработке методики определения зависимости изменения режима работы автономного инвертора напряжения от температуры обмоток тягового двигателя, которая основана на определении эффективности тягового привода. Особенностью методики является определение КПД привода по результатам решения задачи оптимизации параметров тягового привода с применением комбинированного метода поиска на базе генетического алгоритма и метода Нелдера - Мида. Предложенные целевые функции для определения эффективности привода позволяющие определить его оптимальные режимы работы при применении различных режимов ШИМ. Для режимов разгона и торможения предложено применение векторной целевой функции с компонентами, обусловленными КПД и силой тяги, а для режима поддержания скорости движения скалярная функция, которая обусловлена КПД привода.

В качестве параметров для режима пространственно-векторной ШИМ выбран вектор с составляющими скольжения и коэффициента модуляции, а для однократної ШИМ - скольжение.

Ключевые слова: асинхронный тяговый двигатель; автономный инвертор напряжения; широтно-импульсная модуляция; оптимальные режимы работы; КПД тягового привода; температура обмоток тягового двигателя.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Андриенко П.Д.*

UDC 629.429.3:621.313

О.М. PETRENKO¹ (NUUE), B.G. LIUBARSKYI² (NTU“KPI”), Y.S. RYABOV³ (ELECTROTIAZHMAH)

¹ Associate Professor, National University of Urban Economy in Kharkiv, tel.: 095 688 27 16, e-mail: petersanya2007@mail.ru

² Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" tel.: 067 993 75 69, e-mail: lboris19111972@mail.ru

³ Candidate of Sciences, SE Plant Electrotyazhmash, Kharkiv, Section Head, tel.: 097 302 14 54

THE RESEARCH OF TEMPERATURE EFFECTS WINDINGS OF THE INDUCTION TRACTION MOTORS ON OPERATION AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTERS

The article is devoted to the development of methods for determining changes depending on the operating mode of autonomous inverter voltage from the traction motor temperature, which is based on determining the effectiveness of traction drive. A feature of the technique is the definition of drive efficiency as a result of solving the problem of optimizing the traction drive parameters using the combined method of the search on the basis of genetic algorithm and method of Nelder - Mead. The proposed target function to determine the effectiveness of its drive for determining the optimum operating conditions when using different modes of PWM. For acceleration and deceleration mode provides the use of a vector of the objective function with the components caused by the efficiency and power of traction, and the mode is the cruise scalar function, which is due to drive efficiency.

As parameters for the mode space vector PWM is selected vector with sliding components and a modulation ratio, and for the single PWM - slip.

Keywords: asynchronous traction motor; autonomous voltage inverter; pulse-width modulation; optimal modes; effectiveness factor; temperature windings traction engine.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andriienko P.D.*