

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВИХ ІНВЕРТОРІВ
ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.56.01.26.01 ПЗ

Розробив: студент групи 214-ЕЕ-Д24
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»

освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»
(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

_____Максим АКСЕНЕНКО
(підпис)

Керівник: д.т.н., доцент,
Олександр ПЛАХТІЙ

Рецензент: к.т.н., доцент кафедри
Надія КАРПЕНКО

Харків – 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота містить 96 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 50 рисунків, 15 таблиць, 19 джерел літератури та 1 додаток.

Ключові слова: автономний інвертор напруги, трирівневий інвертор, алгоритми широтно-імпульсної модуляції, втрати потужності, енергоефективність.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення електричної енергії в тягових інверторах напруги електрорухомого складу.

Метою роботи є дослідження енергетичних характеристик дворівневих і трирівневих інверторів напруги та визначення втрат потужності при використанні різних алгоритмів модуляції.

У роботі виконано порівняльний аналіз дворівневих і трирівневих інверторів напруги, що застосовуються в асинхронних тягових електроприводах. Розглянуто алгоритми одноразової та широтно-імпульсної модуляції, зокрема синусоїдальну, трапецієподібну, векторну та режим перемодуляції. В середовищі Matlab/Simulink розроблено імітаційні моделі інверторів, на яких визначено основні енергетичні показники та вплив методів керування на форму напруги і струму. У програмі Melcosim проведено аналіз статичних і динамічних втрат потужності в силових IGBT-модулях типу CM1200HG-90R і CM1200HC-66C.

Результати показали, що трирівневі інвертори мають вищу енергоефективність і менші гармонійні спотворення порівняно з дворівневими, що підтверджує доцільність їх використання в тягових електроприводах електрорухомого складу.

ABSTRACT

This qualification work includes 96 pages of an A4 explanatory note, including 50 figures, 15 tables, 19 references, and 1 appendix.

Keywords: voltage source inverter, three-level inverter, PWM algorithms, power losses, energy efficiency.

The object of research is the energy conversion processes in traction voltage source inverters of electric rolling stock.

The aim of the research is to analyze the energy characteristics of two-level and three-level voltage inverters and to determine power losses under different modulation algorithms.

A comparative analysis of two-level and three-level inverters used in asynchronous traction drives has been carried out. The study covers single modulation and pulse-width modulation (PWM) algorithms, including sinusoidal, trapezoidal, vector, and overmodulation modes. Simulation models of both inverters were developed in Matlab/Simulink to evaluate their energy parameters and waveform quality. Using

Melcosim, static and dynamic power losses in IGBT modules (CM1200HG-90R, CM1200HC-66C) were calculated.

The results demonstrate that three-level voltage inverters exhibit higher efficiency and lower harmonic distortion than two-level designs, confirming their suitability for traction applications in electric rolling stock.

Зміст

Вступ	7
1. Перетворювачі для тягових електродвигунів рухомого складу	9
1.1 Тенденції розвитку тягового електроприводу	9
1.2 Структура та вхідні перетворювачі електрорухомого складу змінного струму	9
1.3 Структура перетворювачів електрорухомого складу постійного струму	23
2. Аналіз енергетичних показників тягових дворівневих інверторів напруги в режимі одноразової та широтно-імпульсної модуляції	27
2.1. Методи широтно-імпульсної модуляції для систем керування дворівневих інверторів напруги	27
2.2. Методи керування трифазними дворівневими інверторами напруги з одноразовою модуляцією	29
3. Методи керування трифазними трирівневими інверторами напруги	37
4. Аналіз втрат потужності в дворівневих та трирівневих інверторах напруги	51
4.1 Дослідження втрат енергії у дворівневому трифазному автономному інверторі напруги	51
4.2 Аналіз втрат потужності в силових ключах трирівневого інвертора	59
5 Розрахунок витрат та економічної ефективності при впровадженні тягових асинхронних електродвигунів зі статичним перетворювачем електроенергії	65
Висновки	81
Перелік використаних джерел	82
Додаток А – Ілюстраційний матеріал до кваліфікаційної роботи	84

					<i>КРМ.273.56.01.26.01 ПЗ</i>		
		№ докум.	І				
Розробив	Аксененко М.Д.			<i>Підвищення енергетичної ефективності тягових інверторів електрорухомого складу</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив	Плахтій О.А.						95 4
Рецензент	Карпенко Н.П.				УкрДУЗТ		
Н. контр.	Плахтій О.А.						
Затвердив	Бабаєв М.М.						

Список використаних джерел

1. Михальський, В. М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході та виході перетворювачів частот із широтно-імпульсною модуляцією - [Текст]. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.
2. Зінов'єв, Г. С. Основи силової електроніки - [Текст], навч. посібник, вид. 3-тє. Новосибірськ: вид. НДТУ, 2004, 672 с.
3. Rashid, M. H., Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook 3rd. ed. - [Текст]. Elsevier Inc. 2011, 1389 p.
4. Lazzarin, T., Bauer, G., Barbi, I. Контроль за стратегією для послідовної роботи з єдиною фазою планування ресурсів inverters: analysis, design and experimental results - [Text]. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 6, pp. 2194-2204, Jun. 2013 року.
5. T. Bertin, et al., “Comparison between a Cascaded H-Bridge and Conventional H-Bridge inverter: cost and efficiency study,” *Electronics* (MDPI), 2023.
6. Borrega, M., Marroyo, L., Gonzalez, R., Balda, J., Agorreta, J. L., моделювання та керування master-slave PV inverter з n-paralleled inverters і три-фазом три-лімби inductors - [Текст]. IEEE Trans. Power Electron, Jun. 2013, vol. 28, no. 6, pp. 2842–2855
7. N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley, 3rd ed. — класичний підручник з перетворювачів та ШІМ-методів.
8. Naderi, R., Rahmati, A., Phase-shifted carrier PWM technique for general cascaded inverters-[Текст]. IEEE Trans. Power Electron, May. 2008 vol. 23, no. 3, pp. 1257-1269.
9. Kostic, D. J., Avramovic, Z. Z., Ciric, N. T., Новий приклад до теоретичного аналізу harmonic contents of PWM waveforms of single- and multiple-frequency modulators - [Text]. IEEE Trans. Power Electron, Oct. 2013, vol. 28, no. 10, pp. 4557-4567.

10. Чибіркин В., Боок А., Завгородній В., Аріскін О., Шестоперов Г. Розробка трифазного мостового інвертора для живлення тягових асинхронних електродвигунів електровоза постійного струму // Силова електроніка. 2005. №2.
11. Раков В. А. Електровози серій НС1 та НС3 // Локомотиви вітчизняних залізниць 1956 - 1975. - Київ, 1999. - с. 47 - 53.
12. Васильєв Б.Ю., Добуш В.С. Ефективні алгоритми керування напівпровідниковими перетворювачами в асинхронних електроприводах. - Електрика, 2014 № 4, с. 54–61.
13. Бурков А.Т. Електронна техніка та перетворювачі Навч. для вузів залізничного трансп. - М.: Транспорт, 1999.
14. Перетворювальна техніка. Частина 2: Підручник. / Ю.П.Гончаров, О.В.Будьонний, В.Г.Морозов, М.В.Панасенко, В.Я.Ромашко, В.С.Руденко. Під ред. В.С.Руденко. – К.: ІСДО, 1999, – 329 с.
15. Руденко В.С., Сенько В.І., Чиженко І.М. Перетворювальна техніка.-К.: Вища школа, 1983.
16. Феоктистів В. П. Тяговий електродвигун постійного струму як ланка системи автоматичного регулювання. -2012. - №4. - С.27-29.
17. Горбачов Г.М., Чаплігін Є.Є Промислова електроніка. - М.: Вища школа, 1988 - 320с.
18. Тверд М., Зеленський І., Копчак Л.С., Копчак Б.Л. Універсальний перетворювач частоти для електроприводів змінного струму. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. «Силова електроніка та енергоефективність». Частина 1. 2004. С.19-20.
19. Тверд М., Зеленський І., Копчак Л.С., Копчак Б.Л. Перетворювач частоти з векторним управлінням та розширеними функціональними можливостями // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика. Випуск 45. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005.