

АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»  
ФІЛІЯ «ПРОЕКТНО-ВИШУКУВАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ», ХАРКІВСЬКЕ ВІДДІЛЕННЯ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Краснов Олексій Олександрович

УДК 629.423.1:621.314.58

## ДИСЕРТАЦІЯ

### АКТИВНИЙ ТЯГОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ З КОЛЕКТОРНИМИ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ

05.22.09 — електротранспорт  
27 — транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



О. О. Краснов

*Ідентичність за змістом  
& іншими прикладами  
дисертації завідувача.*

*Вчений секретар  
спеціальної комісії*



Науковий керівник

Панасенко Микола Васильович,  
доктор технічних наук, професор

Харків — 2020

## АНОТАЦІЯ

*Краснов О. О.* Активний тяговий перетворювач для електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 «Електротранспорт». — АТ «Українська залізниця», філія «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту», Харківське відділення, Міністерство інфраструктури України, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», МОН України. Харків, 2020.

Дисертація присвячена актуальній науково-технічній проблемі підвищення енергетичної ефективності електрорухомого складу змінного струму з колекторними тяговими двигунами за рахунок вдосконалення тягових перетворювачів.

Основу парку вантажних та пасажирських електровозів змінного струму «Укрзалізниці» складають електровози з колекторними тяговими двигунами. Такі електровози мають порівняно низький коефіцієнт потужності. Для електровозів з діодними випрямлячами (ВЛ80К, ВЛ80Т) його величина становить 0,65...0,85, а для електровозів з тиристорними перетворювачами (2ЭС5К, 2ЕЛ5) — 0,3...0,84. Сукупність енергетичних недоліків електрорухомого складу і тягового електропостачання обумовлює порівняно низький коефіцієнт потужності електрифікованих залізниць змінного струму — приблизно 0,7, при цьому за сучасними світовими нормами високим вважається коефіцієнт потужності не нижче 0,95. Тому підвищення енергетичної ефективності тягового навантаження є актуальною задачею.

На сьогодні вітчизняними та зарубіжними спеціалістами розроблено ряд технічних рішень, які забезпечують підвищення енергетичних характеристик електровозів змінного струму. Ці рішення можна умовно об'єднати в три групи: 1) удосконалені схеми тягових перетворювачів та алгоритми їх управління; 2) пасивні і активні компенсатори реактивної потужності, встановлені

на електрорухомому складі; 3) перетворювачі на повністю керованих напівпровідникових приладах (активні перетворювачі). Незважаючи на високі енергетичні характеристики активних перетворювачів, робіт, присвячених дослідженню режимів роботи таких перетворювачів при живленні тягових двигунів постійного струму, на сьогодні недостатньо. Отже, подальший розвиток цього напрямку досліджень можна вважати актуальним.

Базовою ланкою перетворювача для живлення двигуна постійного струму є однофазний активний випрямляч струму. У роботі отримано математичний опис роботи активного випрямляча струму в режимах випрямлення та інвертування. На основі математичного апарату алгебри логіки розроблено уніфікований опис алгоритмів широтно-імпульсної модуляції з синусоїдальним, трапецеїдальним та прямокутно-ступінчатим модуляційним сигналом. Дослідження електромагнітних процесів і порівняння енергетичних характеристик активного випрямляча струму при обраних алгоритмах ШІМ і частоті модуляції 900 Гц, 1200 Гц і 1800 Гц проведено шляхом імітаційного моделювання в MATLAB. Дослідження показали, що при всіх трьох алгоритмах при коефіцієнті модуляції 0,2...1,0 коефіцієнт потужності на вході активного випрямляча струму складає 0,6...0,99 незалежно від частоти модуляції.

Запропоновано силову схему з двозонним регулюванням випрямленої напруги і алгоритм управління активного тягового перетворювача електровоза. Обґрунтовано використання прямокутно-ступінчатої ШІМ з частотою модуляції 1200 Гц. Регулювання випрямленої напруги з коефіцієнтом модуляції менше 0,5 використовується лише в короткочасних режимах роботи.

Розроблено математичну модель системи електричної тяги змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц з урахуванням двох варіантів тягового перетворювача — тиристорного та активного перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією. З точки зору моделювання систем управління перетворювачами розроблена модель є універсальною, оскільки на основі логічних функцій формування та розподілу імпульсів розроблено уніфікований

математичний опис алгоритмів управління тиристорним та активним тяговим перетворювачем. Ця модель реалізована в програмному пакеті MATLAB.

Комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів в системі «тягова мережа — електровоз» дозволило дослідити енергетичну ефективність електровоза з активним тяговим перетворювачем. Так, коефіцієнт потужності електровоза становить 0,839...0,991, а його значення більше 0,9 забезпечується при коефіцієнті модуляції більше 0,5. У номінальному режимі коефіцієнт потужності електровоза з активним тяговим перетворювачем на 19,4 % вище, ніж у електровоза з тиристорним перетворювачем.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги на струмоприймачі електровоза з активним тяговим перетворювачем  $K_U$  в усьому діапазоні регулювання змінюється в межах 3...11 %, а коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму  $K_I$  — в межах 9...17 %. При зміні відстані від електровоза до тягової підстанції в діапазоні 0...10 км коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги електровоза в номінальному режимі складає 5...9 %.

Проведені експерименти показали, що активний тяговий перетворювач є джерелом широкого спектру гармонік напруги та струму. Найменш вигідним при цьому є режим з коефіцієнтом модуляції 0,5...0,6. Результати гармонічного аналізу дозволили встановити характерні групи гармонік, які в основному визначають несинусоїдальність форми відповідних кривих напруги та струму. Тому подальші дослідження активного тягового перетворювача електровоза повинні враховувати необхідність корекції форми напруги та струму. У цілому, результати проведених досліджень показали, що активний тяговий перетворювач забезпечує більш високі енергетичні характеристики, ніж традиційні випрямлячі на основі діодних і тиристорних схем.

*Ключові слова:* електричний транспорт, електровоз змінного струму, тяговий перетворювач, активний випрямляч струму, широтно-імпульсна модуляція, коефіцієнт потужності, математична модель.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Краснов А. А. О возможности снижения потерь энергии при выключении высоковольтных IGBT-приборов и ее схемотехническая энергоэффективность / Н. В. Панасенко, Д. Ю. Шаповалов, А. А. Краснов // Електрифікація транспорту. — 2016. — № 11. — С. 44-52.

2. Краснов А. А. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги / В. Г. Ягуп, А. А. Краснов // Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. — 2017. — Вип. 170. — С. 20-31.

3. Краснов А. А. Энергетические характеристики однофазного активного выпрямителя тока при синусоидальной и трапецеидальной широтно-импульсной модуляции / В. Г. Ягуп, А. А. Краснов, В. В. Божко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2018. — № 2. — С. 3-11.

4. Krasnov O. Analysis of operating modes of single-phase current-source rectifier with rectangular-stepped pulse-width modulation / O. Krasnov, V. Liubarskyi, V. Bozhko, O. Petrenko, O. Dubinina, R. Nuriiev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2018. — № 3/9 (93). — P. 50-57.

5. Краснов О. О. Активний тяговий перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією для електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами / О. О. Краснов, В. Г. Ягуп, В. В. Божко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2018. — № 4. — С. 11-20.

6. Краснов О. О. Математичне моделювання електровоза змінного струму з активним перетворювачем в режимі тяги / О. О. Краснов // Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. — 2018. — Вип. 179. — С. 40-51.

7. Краснов О. О. Шляхи зниження споживання реактивної енергії в системі електричної тяги змінного струму / М. І. Сергієнко, М. В. Панасенко,

О. Ю. Чудный, О. О. Краснов // Локомотив-информ. — 2011. — № 8. — С. 60-65.

8. Краснов О. О. Аналіз сучасних схемотехнічних рішень по підвищенню енергоефективності магістральних електровозів змінного струму з тяговими колекторними двигунами / В. В. Божко, О. О. Краснов // Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте: тезисы междунар. научно-практической конф., 14-17 февраля 2012 г., пгт. Чинадиево. — Днепропетровск: ДИИТ, 2012. — С. 12-13.

9. Краснов О. О. Моделювання системи електропостачання змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц та електрорухомого складу з колекторними тяговими двигунами / О. О. Краснов, Н. М. Панасенко // Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО – 2012»: Материалы VI Международной научно-практической конференции (Мисхор, 2012 г.). — Днепропетровск: ДНУЖТ, 2012. — С. 31-32.

10. Краснов О. О. Зниження споживання реактивної енергії — головний напрямок підвищення енергоефективності електротяги змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц / М. В. Панасенко, О. О. Краснов // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы III Международной научно-практической конференции (Воловец, 2012 г.). — Днепропетровск: ДНУЖТ, 2012. — С. 61-62.

11. Краснов О. О. Математична модель тягової мережі змінного струму для дослідження процесів у бортових компенсаторах реактивної потужності електрорухомого складу / О. О. Краснов // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. Серія «Техніка, технологія». — Київ: ДЕТУТ, 2013. — С. 54-55.

12. Краснов О. О. Математична модель тягового колекторного двигуна для дослідження процесів у силових колах електровоза змінного струму з бортовим компенсатором реактивної потужності / М. В. Панасенко,

О. О. Краснов // Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО – 2014»: Материалы VII Международной научно-практической конференции (Одесса – Днепропетровск, 23-26 октября 2014 г.). — Днепропетровск: ДНУЖТ, 2014. — С. 88-89.

13. Краснов О. О. Основні напрямки підвищення енергоефективності існуючих типів електрорухомого складу змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц / М. В. Панасенко, О. О. Краснов // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы V Международной научно-практической конференции (Воловец, 11-13 июня 2014 г.). — Днепропетровск: ДНУЖТ, 2014. — С. 120-121.

14. Краснов О. О. Імітаційне моделювання системи електричної тяги змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц в пакеті MATLAB для дослідження показників якості електроенергії / М. В. Панасенко, О. О. Краснов // Электрификация транспорта «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2015»: Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції (Одеса, 29.09-2.10.2015 р.). — Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2015. — С. 50-51.

15. Краснов О. О. Алгоритми широтно-імпульсної модуляції в однофазному тяговому перетворювачі на повністю керованих вентилях / О. О. Краснов, В. В. Божко // Электрификация транспорта «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2017»: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 20-21.12.2017 р.). — Дніпро: ДНУЗТ, 2017. — С. 80-81.

## ABSTRACT

*Krasnov O. O.* An active traction converter for AC electric locomotives with DC traction motors. — Qualification research work as a manuscript.

Thesis for candidate degree of technical sciences of specialty 05.22.09 — Electric transport. Joint-Stock Company “Ukrainian zaliznytsia”, Branch “Design and survey institute of railway transport”, Ministry of Infrastructure of Ukraine, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, MES of Ukraine. Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the actual scientific and technical problem of increasing the energy efficiency of the AC electric locomotives with DC traction motors due to the improvement of traction converters.

The basis of the park of freight and passenger AC electric locomotives of “Ukrzaliznytsya” are electric locomotives with DC traction motors. Such electric locomotives have a relatively low power factor. For electric locomotives with diode rectifiers (VL80K, VL80T) its value is 0.65...0.85, and for electric locomotives with thyristor converters (2ES5K, 2EL5) — 0.3...0.84. The aggregate of the energy defects of the electromotive force and traction power causes a relatively low power factor of the AC electrified railways — about 0.7, while according to modern world standards the power factor is not lower than 0.95. Therefore, increasing the energy efficiency of the traction load is an urgent task.

Today, Ukrainian, Russian and foreign specialists have developed a number of technical solutions that provide an increase in the power characteristics of electric locomotives. These solutions can be conventionally grouped into three groups: 1) improved schemes of traction converters and control algorithms; 2) passive and active reactive power compensators installed on the electric locomotives; 3) converters on fully controlled semiconductor devices (active converters). Despite the high energy characteristics of the active converters, investigations of the operation modes of such converters with DC traction motors, today is not enough. Consequently, further development of this research direction can be considered relevant.

The base element of the converter for DC motor is a single-phase active current source rectifier. In the paper a mathematical description of the active current source rectifier in the rectifier and inverter modes is obtained. On the basis of the mathematical apparatus of logic algebra, a unified description of pulse-width modulation algorithms with sinusoidal, trapezoidal, and rectangular-step modulation signals is obtained. Investigation of electromagnetic processes and the comparison of the energy characteristics of the active current source rectifier with selected PWM algorithms and modulation frequencies of 900 Hz, 1,200 Hz and 1,800 Hz is carried out by simulation in MATLAB. Studies have shown that for all three algorithms, at a modulation index of 0.2...1.0, the input power factor of the active current source rectifier is 0.6...0.99 regardless of the modulation frequency.

The power circuit with two-zone regulation of DC voltage and the control algorithm of the active traction converter of the electric locomotive are proposed. The use of rectangular-stepped PWM with a modulation frequency of 1,200 Hz has been substantiated. The regulation of the DC voltage with a modulation index of less than 0.5 is used only in short-term operating modes.

A mathematical model of the AC electric traction system (25 kV, 50 Hz) was developed, taking into account two variants of the traction converter — a thyristor and active converter with pulse-width modulation. From the point of view of modeling of converters control systems, the developed model is universal because on the basis of logic functions of pulse formation and distribution a unified mathematical description of algorithms of thyristor control and active traction converter is developed. This model is implemented in MATLAB.

Computer simulation of electromagnetic processes in the “traction network — electric locomotive” system has allowed to investigate the energy efficiency of an electric locomotive with an active traction converter. So, the power factor is 0.839...0.991, and its value is more than 0.9 provided with a modulation index of more than 0.5. In nominal mode, the power factor of an electric locomotive with an active traction converter is 19.4 % higher than that of an electric locomotive with a thyristor converter.

The THD of the contact wire voltage of the electric locomotive with the active traction converter in the whole range of regulation varies within the range of 3...11 %, and the THD of the contact wire current is within the range of 9...17 %. When changing the distance from the electric locomotive to the traction substation in the range 0...10 km, the THD of contact wire voltage in nominal mode is 5...9 %.

The virtual experiments showed that the active traction converter is the source of a wide spectrum of voltage and current harmonics. The least advantageous is the mode with a modulation index of 0.5...0.6. The results of harmonic analysis allowed to establish characteristic groups of harmonics, which basically determine the non-sinusoidal form of the of voltage and current waveforms. Therefore, in further research works of the active traction converter we must focus on correction of the voltage and current waveforms. In general, the results of the research showed that the active traction converter have higher energy characteristics than traditional rectifiers based on diode and thyristor schemes.

*Keywords:* electric transport, AC electric locomotive, traction converter, active current-source rectifier, pulse-width modulation, power factor, mathematical model.

## REFERENCES

1. Krasnov A. A. O vozmozhnosti snizheniia poter energii pri vykliuchenii vysokovoltnykh IGBT-priborov i yeio skhemotekhnicheskaiia energoeffektivnost / N. V. Panasenko, D. Yu. Shapovalov, A. A. Krasnov // Elektrifikatsiia transportu. — 2016. — № 11. — S. 44-52.
2. Krasnov A. A. Matematicheskoiie modelirovaniie elektroprivoda elektrovoza 2EL5 v rezhime tiagi / V. G. Yagup, A. A. Krasnov // Zbirnyk nauk. prats Ukrainkoho derzhavnogo universytetu zaliznichnoho transportu. — 2017. — Vyp. 170. — S. 20-31.
3. Krasnov A. A. Energeticheskie kharakteristiki odnofaznogo aktivnogo vypriamitelia toka pri sinusoidalnoi i trapetseidalnnoi shirotno-impulsnoi moduliatsii / V. G. Yagup, A. A. Krasnov, V. V. Bozhko // Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznichnomu transporti. — 2018. — № 2. — S. 3-11.
4. Krasnov O. Analysis of operating modes of single-phase current-source rectifier with rectangular-stepped pulse-width modulation / O. Krasnov, B. Liubarskyi, V. Bozhko, O. Petrenko, O. Dubinina, R. Nuriiev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2018. — № 3/9 (93). — P. 50-57.
5. Krasnov O. O. Aktyvnyi tiahovyi peretvoriuvach z shyrotno-impulsnoiu moduliatsiieiu dlia elektrovoza zminnoho strumu z kolektornymy tiahovymy dvyhunamy / O. O. Krasnov, V. G. Yagup, V. V. Bozhko // Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznichnomu transporti. — 2018. — № 4. — S. 11-20.
6. Krasnov O. O. Matematychno modeliuвання elektrovoza zminnoho strumu z aktyvnym peretvoriuvachem v rezhymy tiahyy / O. O. Krasnov // Zbirnyk nauk. prats Ukrainkoho derzhavnogo universytetu zaliznichnoho transportu. — 2018. — Vyp. 179. — S. 40-51.
7. Krasnov O. O. Shliakhy znyzhennia spozhyvannia reaktyvnoi enerhii v systemi elektrychnoi tiahyy zminnoho strumu / M. I. Serhiienko, M. V. Panasenko, O. Yu. Chudnii, O. O. Krasnov // Lokomotiv-inform. — 2011. — № 8. — S. 60-65.

8. Krasnov O. O. Analiz suchasnykh skhemotekhnichnykh rishen po pidvishchenniu enerhoefektyvnosti mahistralnykh elektrovoziv zminnoho strumu z tiahovymy kolektornymy dvyhunamy / V. V. Bozhko, O. O. Krasnov // Bezopasnost i elektromagnitnaia sovместimost na zheleznodorozhnom transporte: tezisy mezhdunar. nauchno-prakticheskoi konf., 14-17 fevralia 2012 g., pgt. Chinadiievo. — Dnepropetrovsk: DIIT, 2012. — S. 12-13.

9. Krasnov O. O. Modeliuvannia systemy elektropostachannia zminnoho strumu napruhy 25 kV, 50 Hz ta elektrorukhomoho skladu z kolektornymy tiahovymy dvyhunamy / O. O. Krasnov, N. M. Panasenko // Elektrifikatsiia transporta «TRANSELEKTRO – 2012»: Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Miskhor, 2012 g.). — Dnepropetrovsk: DNUZhT, 2012. — S. 31-32.

10. Krasnov O. O. Znyzhennia spozhivannia reaktyvnoi enerhii — holovnyi napriamok pidvishchennia enerhoefektyvnosti elektrotiahy zminnoho strumu napruhy 25 kV, 50 Hz / M. V. Panasenko, O. O. Krasnov // Energoberezhennia na zheleznodorozhnom transporte i v promyshlennosti: Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Volovets, 2012 g.). — Dnepropetrovsk: DNUZhT, 2012. — S. 61-62.

11. Krasnov O. O. Matematychna model tiahovoi merezhi zminnoho strumu dlia doslidzhennia protsesiv u bortovykh kompensatorakh reaktyvnoi potuzhnosti elektrorukhomoho skladu / O. O. Krasnov // Problemy ta perspektyvy rozvytku transportnykh system v umovakh reformuvannia zaliznychnoho transportu: upravlinnia, ekonomika i tekhnologii: Materialy VI Mizhнародnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Seriia «Tekhnika, tekhnologii». — Kyiv: DETUT, 2013. — S. 54-55.

12. Krasnov O. O. Matematychna model tiahovoho kolektornoho dvyhuna dlia doslidzhennia protsesiv u sylovykh kolakh elektrovoza zminnoho strumu z bortovym kompensatorom reaktyvnoi potuzhnosti / M. V. Panasenko, O. O. Krasnov // Elektrifikatsiia transporta «TRANSELEKTRO – 2014»: Materialy

VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Odessa – Dnepropetrovsk, 23-26 oktiabria 2014 g.). — Dnepropetrovsk: DNUZhT, 2014. — S. 88-89.

13. Krasnov O. O. Osnovni napriamky pidvyshchennia enerhoefektyvnosti isnuichykh typiv elektrorukhomoho skladu zminnogo strumu napruhy 25 kV, 50 Hz / M. V. Panasenko, O. O. Krasnov // Energoberezhennia na zheleznodorozhnom transporte i v promyshlennosti: Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Volovets, 11-13 iiunia 2014 g.). — Dnepropetrovsk: DNUZhT, 2014. — S. 120-121.

14. Krasnov O. O. Imitatsiine modeliuвання systemy elektrychnoi tiahы zminnogo strumu napruhy 25 kV, 50 Hz v paketi MATLAB dlia doslidzhennia pokaznykiv iakosti elektroenerhii / M. V. Panasenko, O. O. Krasnov // Elektrifikatsiia transportu «TRANSELEKTRO – 2015»: Materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Odesa, 29.09-2.10.2015 g.). — Dnipropetrovsk: DNUZT, 2015. — S. 50-51.

15. Krasnov O. O. Alhorytmy shyrotno-impulsnoi moduliatsii v odnofaznomu tiahovomu peretvoriuvachi na povnistiю kerovanykh ventyliakh / O. O. Krasnov, V. V. Bozhko // Elektrifikatsiia transportu «TRANSELEKTRO – 2017»: Materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Dnipro, 20-21.12.2017 g.). — Dnipro: DNUZT, 2017. — S. 80-81.

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	4
Вступ	5
Розділ 1 Аналіз енергетичної ефективності сучасних систем тягового електроприводу електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами	13
1.1 Коефіцієнт потужності тягового навантаження змінного струму	13
1.2 Удосконалені схеми тягових перетворювачів і алгоритми їх управління	20
1.3 Компенсатори реактивної потужності	26
1.4 Активні та гібридні фільтри	31
1.5 Активні випрямлячі на електрорухомому складі змінного струму	35
1.6 Постановка мети і завдань дослідження	40
Розділ 2 Активні тягові перетворювачі електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами	42
2.1 Постановка завдання розділу	42
2.2 Електромагнітні процеси в однофазному активному випрямлячі струму	43
2.3 Розробка математичного опису алгоритмів ШІМ струму	56
2.4 Комп'ютерне моделювання активного випрямляча струму	65
2.5 Синтез силової схеми та алгоритму управління активного перетворювача для електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами	81
2.6 Висновки по розділу 2	86
Розділ 3 Методика дослідження і аналізу електромагнітних процесів в системі «тягова мережа — електровоз»	89
3.1 Постановка завдання розділу	89
3.2 Модель електровоза з тиристорним перетворювачем	91

	3
3.3 Модель електровоза з активним тяговим перетворювачем	104
3.4 Реалізація математичної моделі в пакеті MATLAB	112
3.5 Методика аналізу результатів дослідження	122
3.6 Перевірка адекватності моделі	125
3.7 Висновки по розділу 3	130
Розділ 4 Результати комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів роботи електровоза з ВІП і АТПр в режимі тяги	132
4.1 Постановка завдання розділу	132
4.2 Результати моделювання електромагнітних процесів роботи ВІП в режимі тяги	133
4.3 Результати моделювання електромагнітних процесів роботи АТПр в режимі тяги	136
4.4 Аналіз енергетичних характеристик електровоза з ВІП і АТПр в усьому діапазоні навантаження	142
4.5 Гармонічний аналіз напруги на струмоприймачі та струму первинної обмотки тягового трансформатора електровоза	150
4.6 Висновки по розділу 4	156
Висновки	158
Перелік джерел посилання	160
Додаток А Визначення економічної ефективності запропонованих схемотехнічних рішень	175
Додаток Б Список публікацій та відомості про апробацію результатів дисертації	182
Додаток В Акти впровадження результатів дисертації	186