ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГУЛАК СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК:629.429.3:621.313

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ ЗА РАХУНОК АДАПТОВАНОЇ ДО СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

05.22.09 – електротранспорт

141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

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 _____ **Сергій ГУЛАК**

Науковий керівник **Віктор ТКАЧЕНКО,**
Доктор технічних наук, професор

Харків–2020

АНОТАЦІЯ

Гулак С.О. Підвищення енергетичних показників електровозів змінного струму за рахунок адаптованої до системи електропостачання компенсації реактивної потужності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.09 – «Електротранспорт» 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України. Харків, 2020.

Дисертація присвячена створенню наукових основ вибору оптимальних параметрів та режимів роботи системи компенсації реактивної потужності на електровозах змінного струму.

Проаналізовані фактори, що мають найбільший вплив на якість тягового електропостачання збоку електрорухомого складу змінного струму. До факторів, що вносять найбільше спотворення форми напруги контактної мережі слід віднести вищі гармонійні складові, які вносяться в систему тягового електропостачання електрорухомим складом.

Показано, що такі чинники, як неякісне струмознімання, проходження електрорухомим складом фідерної зони, наявність декількох одиниць електрорухомого складу на одній фідерній зоні, режими робот електрорухомого складу призводять до того, що процес зміни напруги в контактній мережі є недетермінованим, неергодичним негаусовим процесом, при якому для аналізу спектральних складових тягового стуму електровозу застосування класичних методів перетворення Фур‘є є некоректним.

Аналіз схемотехнічних рішень щодо компенсації реактивної потужності, яка споживається електрорухомим складом змінного струму, показав, що на сьогоднішній день найбільш оптимальним рішенням є застосування гібридних компенсаторів реактивної потужності (ГКРП). В таких компенсаторах пасивна частина зменшує фазовий зсув між напругою вторинної обмотки тягового трансформатора та тяговим струмом, активна частина – видаляє вищі гармонійні

складові тягового струму. Пасивною частиною ГКРП є *LC*-фільтр, а активною - автономний інвертор струму і система керування інвертором. Система керування виконує спектральний аналіз тягового струму, формує алгоритм для генерації автономним інвертором вищих гармонік, однакових по амплітуді але протифазними до вищих гармонік тягового струму. В існуючих системах керування для визначення спектральних складових тягового струму використовуються методи перетворення Фур‘є, які в реальних умовах експлуатації електрорухомого складу дають некоректні результати. Запропоновано для визначення спектральних складових тягового струму застосувати методи кореляційного спектрального аналізу.

Створено математичні та програмно-орієнтовані моделі роботи тягового та допоміжного приводу електровозу змінного струму (на прикладі електровозу ВЛ-80к). Відмінними особливостями цих моделей є можливість врахування взаємного впливу роботи тягового та допоміжного приводів, а також режимів роботи електровозу.

Доопрацьовано методику розрахунку параметрів асинхронних двигунів при несиметричних обмотках статора. Показано взаємозв‘язок таких параметрів, як індуктивність розсіювання та взаємна індуктивність із геометричними параметрами обмоток. Ця методика використовувалась при створенні математичної моделі приводу допоміжних машин, зокрема для моделювання роботи розчіплювача фаз.

Запропоновано для дослідження електродинамічних процесів в приводах допоміжних машин у сталому режимі роботи замінити розчіплювач фаз несиметричною системою напруги, яка живить мотор-вентилятори.

Досліджено взаємний вплив роботи тягового приводу і приводу допоміжних машин. Результати дослідження дозволили уточнити спектральний склад струму в ланцюгах тягового та допоміжного приводів.

Розраховано елементи пасивної та активної частин ГКРП. Розроблено систему керування активною частиною ГКРП, основою якого є блок визначення

гармонійних складових тягового струму та видалення із спектру струму нульової та вищих гармонійних складових.

Запропоновано новий підхід до визначення спектральних складових тягового струму, в основі якого лежить застосування методу лінійного прогнозування Левінсона-Дарбіна. Такий підхід дозволяє враховувати випадковий характер зміни напруги на струмоприймачі електровозу і, як наслідок, тягового струму, та адаптувати роботу компенсатора до параметрів напруги контактної мережі. Застосування зазначеного підходу дозволяє також враховувати такі фактори, як характер режиму роботи електровозу, прохід меж ділянок контактної мережі, тощо.

Скорегована математична модель тягового приводу при застосуванні ГКРП, розраховано та побудовано амплітудно-частотні та фазо-частотні спектральні характеристики напруги та струму тягової обмотки трансформатора. Розраховано коефіцієнт потужності модернізованого тягового приводу.

Обґрунтовано застосування в системі живлення допоміжних машин статичного перетворювача замість фазорозчіплювача. Виконано математичне моделювання системи допоміжного приводу електровозу, розраховано та побудовано амплітудно-частотні та фазочастотні спектральні характеристики напруги на обмотці власних потреб трансформатора та струму, що протікає по обмотці власних потреб. Розраховано коефіцієнт потужності модернізованого допоміжного приводу.

Розраховано втрати активної та повної потужності в тяговому та допоміжному приводах електровозу до та після модернізації. Розраховано залежності ККД і коефіцієнту потужності приводів до та після модернізації. Отримані результати свідчать про те, що ККД тягового приводу після застосування компенсатора знизився на $0,6\%$, а коефіцієнт потужності збільшився на $3,2\%$. ККД допоміжного приводу після модернізації збільшився на $1,5\%$, а коефіцієнт потужності – на $26,4\%$.

Розроблені наукові положення є ефективним інструментом модернізації існуючого парку вантажних електровозів змінного струму серій ВЛ-80т та ВЛ-80к і створення нового електрорухомого складу залізниць. Результати дисертаційної роботи впроваджені у «Науково-дослідному та конструкторсько-технологічному інституті залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця» (м. Київ), ДП «Український науково-дослідницький інститут вагонобудування» (м. Кременчук) та у навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій (м. Київ).

Ключові слова: електрорухомий склад, електротранспорт, тяговий привод, допоміжний привод, система тягового електропостачання, коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії, вищі гармонійні складові напруги, розчіплювач фаз, нелінійність, несинусоїдальність, несиметрія.

Список публікацій здобувача

1. Гулак С. А., Слепухин, А. Ю., Черных, Ю. М., Ермоленко Э. К. Метод уменьшения высших гармоник в напряжении питания тягового привода электровозов переменного тока с коллекторными двигателями/С.А. Гулак, А.Ю. Слепухин, Ю.М., Черных, Э. К. Ермоленко //«Вестник БелГУТ: Наука и транспорт». Научно-практический журнал. – Гомель: БелГУТ, 2014. - №1 (28). – С. 11 – 12.

2. Гулак С., Єрмоленко Е. Модель системи «Тягова підстанція – контактна мережа – тяговий привод електровоза серії ВЛ-80^{Т,К}»/С. Гулак, Е. Єрмоленко //Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 28. - К.: ДЕТУТ, 2016. - С. 99-109.

3. Гулак С. О., Єрмоленко Е. К., Черних Ю. М., Усватов М. О. Визначення динамічних змінних узагальненого асинхронного двигуна/С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко, Ю.М. Черних, М.О. Усватов//Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – К.: ДЕТУТ, 2016. – №. 29. – С. 143-153.

4. Гулак, С. Єрмоленко Е., Гаюр, А., Сидоренко О. Модель мотор-вентилятора електровоза ВЛ-80к при несиметрії фазних напруг та несинусоїдальній напрузі живлення/С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко, А.В. Гаюр, О.В. Сидоренко//Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 30. К.: ДЕТУТ, 2017. – С. 139 - 148.

5. Гулак С.О., Єрмоленко Е.К. Розробка математичної моделі для дослідження роботи приводу допоміжних машин електровозів серій ВЛ-80^{Т,К}, що працюють в несинусоїдальному та несиметричному режимах/С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко//Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - №2 (243). – 2018. – С. 80 – 92.

6. Гулак С. Методичні рекомендації щодо застосування моделі фізичних процесів у трифазному асинхронному двигуні./С.О. Гулак//Транспортні системи і технології. – К.: ДУІТ, 2018. - №1(32). – С. 4-13.

7. Гулак С., Єрмоленко Е, Заіка Д. Аналіз впливу електрорухомого складу на показники якості електроенергії тягової системи електропостачання. /С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко, Д.О. Заіка//Транспортні системи і технології – К.: ДУІТ, 2019. - №1(33). – С. 156-170.

8. Goolak S., Gerlici J., Sapronova S., Tkachenko V., Lack T., Kravchenko K. Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives/S. Goolak, J. Gerlici, S. Sapronova, V. Tkachenko, T. Lack, K. Kravchenko//Communications-Scientific letters of the University of Zilina. – 2019. – Vol. 21. – Issue. 2. – P. 24-31.

9. Гулак С.О. Обґрунтування можливості застосування адаптивних методів керування для побудови системи керування комбінованим компенсатором реактивної потужності/С.О. Гулак//Матеріали XLIV наук.-практ. конференції [«Сучасні проблеми залізничного транспорту»]. – К.: ДЕТУТ. - 2014. – Ч. 1. –С. 197.

10. Гулак С.О. Обґрунтування застосування активних методів компенсації реактивної енергії на електровозах змінного струму серії ВЛ80к,т/С.О. Гулак//

Матеріали наук.-практ. Конф. [«Розвиток науки і техніки на залізничному транспорті»]. – К.: ДЕТУТ. - 2014. – С. 39.

11. Гулак С. О. Єрмоленко Е. К. Розробка моделі допоміжного приводу електровозів змінного струму ВЛ80т,к для дослідження електромагнітних процесів з метою визначення впливу вищих гармонійних складових на режими роботи допоміжних машин/С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко//Матеріали XLVII наук.-практ. конф. [«Залізниця: вчора, сьогодні, завтра»]. – К.: ДЕТУТ. - 2016. – С. 93.

12. Гулак С.О., Єрмоленко Е.К., Черних Ю.М. Математична модель приводу допоміжних машин електровозів серії ВЛ-80Т,К для дослідження роботи приводу в несиметричному та несинусоїдальному режимах/С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко, Ю.М. Черних//Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф. [«Транспорт і логістика: проблеми та рішення»]. – Одеса: Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет. - 2018. – С. 68.

13. Гулак С.О., Черних Ю.М., Черняк Ю.В. Визначення власних і взаємних індуктивностей в асинхронному двигуні з несиметричними обмотками/ С.О. Гулак, Ю.М. Черних, Ю.В. Черняк//Матеріали 79 Міжнародної наук.-практ. конф. [«Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»]. – Дніпро: ДНУЗТ, 2019. – С. 131.

ABSTRACT

Goolak S.O. Increasing the energy performance of AC electric locomotives through reactive power compensation adapted to the power supply system. - Qualifying research paper as manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering (Doctor of Philosophy) in specialty 05.22.09 - "Electrotransport" 141 - Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics) - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", MES of Ukraine. Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to creation of scientific bases of a choice of optimum parameters and operating modes of system of compensation of reactive power on electric locomotives of alternating current.

The factors that have the greatest impact on the quality of traction power supply from the side of the electric rolling stock of alternating current are analyzed. The factors that cause the greatest distortion of the voltage form of the catenary include the higher harmonic components, which are introduced into the traction power supply system by electric rolling stock.

It is shown that such factors as poor current collection, passage of electric rolling stock of the feeder zone, the presence of several units of electric rolling stock in one feeder zone, modes of operation of electric rolling stock lead to the fact that the process of voltage change in the catenary is nondeterministic for the analysis of the spectral composition of the traction current of an electric locomotive, the application of classical Fourier transform methods is incorrect.

The analysis of circuit solutions for the compensation of reactive power consumed by the electric rolling stock of alternating current showed that to date the most optimal solution is the use of hybrid reactive power compensators (HRPC). In such compensators, the passive part reduces the phase shift between the voltage of the secondary winding of the traction transformer and the traction current, the active part - removes the higher harmonic components of the traction current. The passive part of the HRPC is LC-filter, and the active stand-alone current inverter and control system of inverter. The control system of inverter performs spectral analysis of the

traction current, forms an algorithm for the generation of autonomous inverter higher harmonics, the same amplitude but antiphase to the higher harmonics of the traction current. Existing control systems use Fourier transform methods to determine the spectral components of the traction current, but in real operating conditions of the electric rolling stock they are incorrect. It is proposed to apply the methods of correlation spectral analysis to determine the spectral components of the traction current.

Mathematical and program-oriented models of operation of the traction and auxiliary drive of the AC electric locomotive (on the example of the VL-80k electric locomotive) were created. Distinctive features of these models are the ability to take into account the mutual influence of traction and auxiliary drives, as well as modes of operation of the electric locomotive.

The method of calculating the parameters of induction motors with asymmetric stator windings has been improved. The relationship between parameters such as scattering inductance and mutual inductance with the geometric parameters of the windings is shown. This technique was used in the creation of a mathematical model of the drive of auxiliary machines, in particular for modeling the operation of the phase release.

It is proposed to replace the phase release with an asymmetric voltage system that feeds the motor-fans to study the electrodynamic processes in the drives of auxiliary machines in steady-state operation.

The mutual influence of the work of the traction drive and the drive of auxiliary machines is investigated. The results of the study allowed clarifying the spectral composition of the current in the circuits of traction and auxiliary drives.

The elements of the passive and active parts of HRPC are calculated. A control system for the active part of the HRPC has been developed, the basis of which is a unit for determining the harmonic components of the traction current and removing zero and higher harmonic components from the current spectrum.

A new approach to determining the spectral components of traction current is proposed. This approach is based on the application of the Levinson-Darbin linear

prediction method. This approach allows to take into account the random nature of the voltage change at the current collector of the electric locomotive and, as a consequence, the traction current, and to adapt the operation of the compensator to the voltage parameters of the catenary. The application of this approach also allows taking into account such factors as the nature of the mode of operation of the electric locomotive, the passage of the boundaries of the catenary, and so on.

The mathematical model of the traction drive when using HRPC is corrected, the amplitude-frequency and phase-frequency spectral characteristics of the voltage and current of the traction winding of the transformer are calculated and constructed. The power factor of the modernized traction drive is calculated.

The use of a static converter instead of a phase breaker in the power supply system of auxiliary machines is substantiated. Mathematical modeling system of auxiliary drive of the electric locomotive is performed, amplitude-frequency and phase-frequency spectral characteristics of the voltage of the winding of the transformer's own winding and the current flowing in the winding of the own needs are calculated and constructed. The power factor of the modernized auxiliary drive is calculated.

The losses of active and full power in the traction and auxiliary drives of the electric locomotive before and after the modernization are calculated. The dependences of factor efficiency and factor power of drives before and after modernization are calculated. The obtained results show that the factor efficiency of the traction drive after the application of the compensator decreased by $0,6\%$, and the power factor increased by $3,2\%$. The factor efficiency of the auxiliary drive after modernization increased by $1,5\%$, and the power factor - by $26,4\%$.

The developed scientific provisions are an effective tool for modernization of the existing fleet of electric locomotives of the VL-80t and VL-80k series and the creation of a new electric rolling stock of railways. The results of the dissertation were implemented at the Scientific Research Design and Engineering Institute of Railway Transport of OJSC «Ukrzaliznytsya» (Kyiv), SE «Ukrainian Research Institute of

Carriage» (Kremenchuk) and in the educational process of the State University of Infrastructure and Technology (Kyiv).

Keywords: electric rolling stock, electric transport, traction actuator, auxiliary actuator, system of traction power supply , power factor, efficiency, higher harmonic components of voltage, phase splitter, nonlinearity, non-sinusoidal, asymmetry.

REFERENCES

1. Goolak S.A., Slyepuhin A.Yu., Chernyh Yu.M., Yermolenko E.K. Method umensheniya vysshih garmonik v napryazhenii pitaniya tyagovogo privoda electrovozov pyeremyennogo toka s collectornymi dvigatyekyami/S.A. Goolak, A.Yu. Slyepuhin, Yu.M. Chernyh, E.K. Yermolenko//«Vyesnik BelGUT: Nauka i transport». Nauchno-prakcticheskiy Zhurnal. – Gomel: BelGUT, 2014. - №1 (28). – S. 11 – 12.

2. Goolak S., Yermolenko E. Model systemy «Tyagova pidstantsiya – contactna merezha – tyagovyy pryvod electrovozu seriyi VL-80^{T,K}»/S. Goolak, E. Yermolenko//Zbirnyk naukovyh prats Derzhavnogo economiko-technologicnogo universytetu transportu Ministerstva osvity i nauky Ukrayiny: Seriya «Transportni systemy i technologiyi». – Vyp. 28. - K.: DETUT, 2016. - S. 99-109.

3. Goolak S.O., Yermolenko E.K., Chernyh Yu. M., Usvatov M.O. Vyznachennua dynamichnyh zminnyh uzagalnenogo asynhronnogo dvyguna/S.O. Goolak, E.K. Yermolenko, Yu.M. Chernyh, M.O. Usvatov//Zbirnyk naukovyh prats Derzhavnogo economiko-technologicnogo universytetu transportu. Seriya «Transportni systemy i technologiyi». – K.: DETUT, 2016. – №. 29. – S. 143-153.

4. Goolak S., Yermolenko E., Hayur A., Sydurenko O. Model motor-ventylyatora electrovoza VL-80к pry nesymetriyi faznyh naprug ta nesynusoyidalniy napruzi xhyvlennya/S.O. Goolak, E.K. Yermolenko, A.V. Hayur, O.V. Sydurenko// Zbirnyk naukovyh prats Derzhavnogo economiko-technologicnogo universytetu transportu Ministerstva osvity i nauky Ukrayiny: Seriya «Transportni systemy i technologiyi». – Vyp. 30. K.: DETUT, 2017. – S. 139 - 148.

5. Goolak S.O., Yermolenko E.K. Rozrobka mathemztychnoyi modeli dlya doslidzhennya roboty pryvodu dopomixhnyh mashyn electrovoziv seriy VL-80^{T,K}, ssho pratsyuyut v nesynusoyidalnomu ta nesymetrycnomu rezhymah/S.O. Goolak, E.K. Yermolenko//Visnyk Shidnoukrayinskogo natsionalnogo universytetu im. V Dalya. - №2 (243). – 2018. – S. 80 – 92.

6. Goolak S. Methodychni rekomendatsiyi sshodo zastosuvannya modeli fizychnyh protsesiv u tryfaznomu asynchronnomu dvyguni./S.O. Goolak//Transportni systemy i technologiyi. – K.: DUIT, 2018. - №1(32). – S. 4-13.

7. Goolak S., Yermolenko E., Zaika D. Analiz vplyvu electroruchomogo skladu na pokaznyky ykusti tyagovoyi systemy electropostachannya./S.O. Goolak, E.K. Yermolenko, D.O. Zaika//Transportni systemy i technologiyi. – K.: DUIT, 2019. - №1(33). – S. 156-170.

8. Goolak S., Gerlici J., Sapronova S., Tkachenko V., Lack T., Kravchenko K. Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives/S. Goolak, J. Gerlici, S. Sapronova, V. Tkachenko, T. Lack, K. Kravchenko//Communications-Scientific letters of the University of Zilina. – 2019. – Vol. 21. – Issue. 2. – P. 24-31.

9. Goolak S.O. Obgruntuvannya mozhlyvosti zastosuvannya adaptyvnyh methodiv keruvannya dlya pobudovy systemy keruvannya комбінованим compensatorom reactyvnoiyi potuzhnosti/S.O. Goolak// Materialy XLIV nauk.-pract. conf. [«Suchasni problemy zaliznychnogo transportu»]. – K.: DETUT. - 2014. – Ch. 1. – S. 197.

10. Goolak S.O. Obgruntuvannya zastosuvannya actyvnyh methodiv compensatsiyi reactyvnoyi energiyi na electrovozah zminnogo stumu seriyi VL80к,т/S.O. Goolak// Materialy nauk.-pract. conf. [«Rozvytok nauky I techniky na zaliznychnomu transporti»]. – K.: DETUT. - 2014. – S. 39.

11. Goolak S.O. Yermolenko E.K. Rozrobka modeli dopomizhnogo pryvodu electrovoziv zminnogo strumu з VL80т,к dlya doslidzhennya electromagnitnyh protsesiv z metoyu vyznachennya vplyvu vysshyh garmoniynyh skladovyh na rezhymy roboty dopomizhnyh machyn/S.O. Goolak, E.K. Yermolenko// Materialy

XLVII nauk.-pract. conf. [«Zaliznytsya vchora, syogodni, zavtra»]. – K.: DETUT. - 2016. – S. 93.

12. Goolak S.O., Yermolenko E.K., Crernyh Yu.M. Mathematycha model pryvodu dopomizhnyh machyn electrovoziv seriyi VL80K,T dlya doslidzhennya roboty pryvodu v nesymetrycnomu ta nesynusoyidalnomu rezhymah/S.O. Goolak, E.K. Yermolenko, Yu.M. Crernyh// Materialamy VIII Mizhnarudnoyi nauk.-pract. conf. [«Transport i logystyka: problem ya rishennya»]. – Odesa: Shidnoukrayinskyy natsionalnyy universytet im. V Dalya, Odesskyy natsionalnyy національний morskyy universytet. - 2018. – S. 68.

13. Goolak S.O., Crernyh Yu.M., Chernyak Yu.V. Vyznachennya vlasnyh ta vzayemnyh inductyvnostey v asynhronnomu dvyguni z nesymetrychnymy obmotkamy/S.O. Goolak, Yu.M. Crernyh, Yu.V. Chernyak//Materialy 79 Mizhnarudnoyi nauk.-pract. Conf. [«Problemy ta perspectyvy rozvytku zaliaznychnogo transportu»]. – Dnipro: DNUZT. - 2019. – S. 131.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 4

ВСТУП 5

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ВИКОРИСТАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ 13

1.1. Аналіз факторів, що впливають на якість тягового електропостачання 13

1.2. Аналіз схемотехнічних рішень щодо компенсації реактивної потужності на електрорухомому складі змінного струму 20

1.3. Аналіз робіт з підвищення енергетичних показників електровозів змінного струму 32

1.4. Висновки до розділу 1 та постановка задач на дослідження 46

РОЗДІЛ 2. ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕННЯ, ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ 49

2.1. Напрям дослідження 49

2.2. Аналіз факторів що впливають на зниження коефіцієнту потужності електровозів змінного струму 49

2.4. Загальна методика дисертаційного дослідження 58

2.5. Методи вирішення задач 60

2.6. Висновки до розділу 2 61

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ДІЛЯНКИ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОЇ ЗАЛІЗНИЦІ З ЕЛЕКТРОВОЗАМИ, ОБЛАДНИМИ ГІБРИДНИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ 63

3.1. Побудова моделі контактної мережі 64

3.2. Побудова моделі тягового приводу 67

3.3. Розробка математичної моделі мотор-вентилятора та мотор-компресора електровозів серій ВЛ-80^{Т,К}, що працюють в несинусоїдальному та несиметричному режимах 85

3.4. Розрахунок взаємної та власних індуктивностей асинхронного двигуна з несиметричними обмотками 92

3.5. Розробка математичної моделі системи допоміжних машин електровозу 102

3.6. Дослідження взаємного впливу роботи приводу допоміжних машин та роботи тягового приводу на коефіцієнт потужності приводу допоміжних машин 117

3.7. Розробка схеми компенсації реактивної потужності в ланцюгах тягового приводу 123

3.8. Розробка заходів, направлених на підвищення енергетичних показників приводу допоміжних машин електровозу 145

3.9. Висновки до розділу 3 152

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНІСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА СТАТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ЕЛЕКТОВОЗАХ ЗМІННОГО СТРУМУ 156

4.1. Розрахунок коефіцієнту потужності та ККД при впровадженні компенсатора реактивної потужності в тяговому приводі 156

4.2. Розрахунок коефіцієнту потужності та ККД при впровадженні статичного перетворювача замість фазорозчіплювача 170

4.3. Порівняння сумарних втрат потужності від впровадження компенсатора реактивної потужності та модернізації допоміжного приводу 180

4.4. Висновки до розділу 4 182

ВИСНОВКИ 184

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 187

ДОДАТОК А 201

ДОДАТОК Б 205