

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНФРАСТРУКТУРИ І ТРАНСПОРТУ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШИЛО СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 621.31


ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОЇ ПЕРЕДАЧІ
ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

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


_____ С.І. Шило

Науковий керівник Андрієнко Петро Дмитрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів Національного університету «Запорізька політехніка»

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Шило С. І. Підвищення ефективності тягової передачі електропоїздів постійного струму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 «Електротранспорт». – Національний університет «Запорізька політехніка», Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій, Дніпро, 2025.

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу, пов'язану з дослідженням та створенням нової ефективної схеми імпульсного управління тяговою електропередачею електропоїздів постійного струму, яка дозволяє формування статичних і динамічних характеристик тягових двигунів з послідовним збудженням аналогічних характеристикам двигунів паралельного збудження без використання допоміжних джерел живлення.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка та дослідження алгоритмів роботи, засобів технічної реалізації, спрямованих на підвищення техніко-економічних показників тягових високовольтних перетворювачів електропередачі електропоїздів.

Об'єкт дослідження – електромеханічні процеси в тягових електропередачах електропоїздів постійного струму.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі вперше: розроблені та досліджені нові алгоритми, що дозволяють методом змінної структури імпульсного перетворювача, на відміну від існуючих, формувати статичні та динамічні характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням аналогічних двигунів з незалежним збудженням без застосування допоміжних джерел живлення та підвищити техніко-економічні показники тягового електроприводу; розроблено алгоритм, який дозволяє засобами силової електроніки в тяговому перетворювачі зі змінною структурою реалізувати швидкодіючий захист від режимів ковзання та буксування послідовно з'єднаних двигунів послідовного збудження, що сприяє покращенню тягових

характеристик приводу; методом комп'ютерного моделювання досліджено новий алгоритм захисту від ковзання ходових коліс тягового приводу та отримані нові залежності параметрів двигунів (струму, напруги, швидкості) від коефіцієнту зчеплення. Отримали подальший розвиток: методика порівняльного вибору напівпровідникових приладів, яка, на відміну від існуючої, враховує реальні коефіцієнти теплового стану та втрати потужності; метод дослідження теплових процесів систем напівпровідник-охолоджувач, який, на відміну від існуючих, враховує повну модель конструкції охолоджувачів, яка входить у модель імпульсного перетворювача.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Електричні та електронні апарати» Національного університету «Запорізька політехніка» відповідно до тематичного плану наукових досліджень за держбюджетною темою ДБ 03715 «Енергоощадне керування експлуатаційними характеристиками та параметрами систем електричної тяги автономного електрорухомого складу» (номер держреєстрації 0115U002567) та кафедральною науковою темою №03418 «Дослідження системи прогнозування енергоефективності та діагностики високовольтного обладнання», а також планів ТОВ «НДІ «Перетворювач» зі створення перетворювачів для тягових передач рухомого залізничного транспорту і промислових електроприводів постійного та змінного струму.

Проведено аналіз сучасного стану електричного рухомого складу України, виявлено значний знос рухомого складу (до 90%) та застарілі технічні рішення тягової електропередачі. Встановлено, що для зниження енергетичних та експлуатаційних витрат необхідна модернізація тягових систем, особливо в умовах обмежених економічних ресурсів. Для виконання цього завдання запропоновано нову модернізовану схему імпульсного керування частотою обертання двигунів постійного струму послідовного збудження. В основі схеми лежить принцип безконтактної зміни структури силових кіл на періоді модуляції струму якоря або збудження, що дозволяє істотно поліпшити енергетичні характеристики двигунів.

Показано, що завдяки значно більшій постійній часу обмотки збудження і спеціальній схемі підключення шунтуючого діода, струм збудження двигуна практично постійний і величина його сягає амплітуди пульсуючого струму якоря, що підвищує середній момент двигуна, зменшує його пульсації і відповідно зменшує додаткові втрати в осерді обмотки збудження.

Розроблені алгоритми роботи нової схеми в пускових, сталих і гальмівних режимах, які стали основою для розробки імітаційних комп'ютерних моделей.

Впроваджено імітаційні комп'ютерні моделі, які дозволяють дослідити електромагнітні та теплові процеси в схемі, сформувані вимоги до вибору параметрів напівпровідникових приладів.

Розроблено комплексну комп'ютерну модель, яка дала змогу детально дослідити електромеханічні процеси в запропонованій схемі та визначити основні режими роботи двигунів постійного струму з послідовним збудженням. Результати моделювання підтверджено експериментально на спеціально створеному лабораторному стенді потужністю 3,8 кВт з двигуном постійного струму. Експериментально встановлено, що запропонована схема забезпечує підвищення середнього крутного моменту на 5-7% залежно від стану магнітної системи двигуна. Надані рекомендації до побудови тягових передач при модернізації та побудові перспективних енергоефективних тягових передач електропоїздів постійного струму.

Окремо досліджено можливості ефективного динамічного гальмування з номінальним моментом при зниженні швидкості обертання якоря до 8% від номінальної. Це дозволяє забезпечити високу керованість електропоїздів у режимах гальмування та знизити витрати електроенергії порівняно з традиційними схемами. Показано, що в режимі гальмування за алгоритмом, який забезпечує постійний струм гальмування з можливістю рекуперації енергії в мережу, схема забезпечує постійний струм якоря та електромагнітний момент при гальмуванні з рекуперацією енергії в мережу і реостатну характеристику на кінцевій ділянці гальмування. Визначені особливості роботи напівпровідникових приладів у цьому режимі.

Також у дисертації розроблено швидкодіючий алгоритм захисту від буксування колісних пар, що базується на контролі різниці швидкостей обертання двигунів. Показано, що для припинення буксування колісної пари необхідно зменшити електромагнітний момент електродвигуна, який приводить її в рух. В електродвигуні постійного струму при послідовній схемі включення електромагнітний момент буде прямопропорційним струму якоря, тому для зниження електромагнітного моменту достатньо знизити струм якоря електродвигуна, шунтуючи його опором за допомогою силового ключа. Щоб оцінити вплив опору на зниження струму якоря з урахуванням дії проти-ЕРС тягового електродвигуна розглянуто схему заміщення. Побудовано залежності отриманих величин у відносних одиницях. За базові значення прийняті номінальний струм, опір обмотки якоря тягового електродвигуна. Встановлено, що розроблений алгоритм забезпечує ефективну стабілізацію з різницею швидкості обертання двигунів не більше ніж 0,06% від номінальної протягом 4-20 періодів модуляції, що істотно підвищує надійність та безпеку руху електропоїздів.

Проведено порівняльний аналіз запропонованої схеми з альтернативними перспективними тяговими передачами, зокрема на базі асинхронних двигунів. Показано, що модернізована схема тягової передачі з двигуном постійного струму економічно вигідніша для електропоїздів приміського сполучення завдяки вищому інтегральному коефіцієнту корисної дії (на 3-5% вищий порівняно з асинхронними двигунами). Ця обставина робить коефіцієнт корисної дії двигунів приблизно однаковим, що знімає один із основних недоліків двигуна постійного струму з імпульсним регулюванням. У роботі наведено порівняльний аналіз характеристик двох систем тягового електроприводу.

Додатково досліджено перспективні схеми та алгоритми побудови перетворювачів живлення власних потреб електропоїзда. Запропоновано рекомендації щодо їх схемної реалізації, що забезпечують стабільну роботу обладнання при суттєвих коливаннях напруги контактної мережі. Показано, що запропоновані рішення модернізації джерел живлення власних потреб, які є

складовою електроприводу, дають змогу без збільшення споживання потужності з мережі підвищити корисну потужність власних потреб на 7-10 кВт (27÷33%), за рахунок чого підвищити комфорт у секції салонів, зменшити шум та вібрації, реалізувати додаткове охолодження повітря. Розглянуто схеми та алгоритми побудови перетворювача власних потреб при коливаннях вхідної напруги тягової мережі. У результаті аналізу рекомендовано каскадну схему зі стабілізацією напруги перед кожним каскадом. Алгоритм дозволяє оптимізувати параметри трансформатора за масою, встановлена потужність якого відповідає номінальному режиму, а саме утричі менше ніж при алгоритмах без стабілізації вхідної напруги. Наявність ключа дозволяє шунтувати аварійний інвертор і відповідно забезпечувати роботу перетворювача при виході з ладу одного з інверторів.

Розроблені технічні рішення впроваджено у виробництво на ТОВ «НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) в процесі модернізації електровоза ЧМ1, приводів мостового крану вантажопідйомністю 60 т на Алчевському металургійному комбінаті, а також при створенні перетворювача живлення власних потреб для дизель-поїзда ДЕЛ-02 виробництва ПАТ «Луганськтепловоз». Результати роботи інтегровані в освітній процес Національного університету «Запорізька політехніка» для підготовки студентів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Основні результати дослідження опубліковані в 11 наукових працях, з яких 9 – у фахових виданнях України та за кордоном, зокрема у виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science, та представлені на 6 міжнародних та національних науково-практичних конференціях.

Ключові слова: імпульсний перетворювач, тяговий двигун, постійний струм, послідовне збудження, паралельне збудження, частота обертання, комп'ютерна модель, фізична модель, асинхронний двигун, напівпровідниковий прилад.

ANNOTATION

Shylo S.I. Improving the efficiency of traction transmission in DC electric trains.
– Qualifying scientific work in manuscript rights.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.09 «Electric Transport». – National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Dnipro Institute of Infrastructure and Transport of Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2025.

The thesis solves a scientific and practical problem related to the research and development of a new efficient pulse control scheme for traction power transmission of DC electric trains, which allows the formation of static and dynamic characteristics of traction motors with sequential excitation similar to those of parallel excitation motors without the use of additional power sources.

The aim and tasks of the research. The aim of the dissertation is to develop and study operating algorithms and technical solutions aimed at improving the technical and economic performance of high-voltage traction converters for DC electric trains.

The subject of research is electromechanical processes in traction transmissions of DC electric trains.

Scientific novelty of the results. For the first time: new algorithms have been developed and studied which, unlike the existing ones, make it possible to make the static and dynamic characteristics of a DC motor with series excitation similar to those of motors with independent excitation without the use of auxiliary power sources, and to improve the technical and economic performance of the traction electric drive; an algorithm has been developed which makes it possible to implement high-speed protection in the power electronics of a traction converter with a variable structure. The following aspects have been developed: a method for the comparative selection of semiconductor devices which, unlike the existing one, takes into account the real coefficients of thermal state and power dissipation; a method for the study of thermal processes in semiconductor cooler systems which, unlike the existing ones, takes into

account the complete model of the cooler design included in the model of the pulse converter.

The dissertation was conducted at the Department of Electrical and Electronic Equipment of National University "Zaporizhzhia Polytechnic" in accordance with the thematic research plan under the state budget theme DB 03715 "Energy-saving control of operating characteristics and parameters of electric traction systems of autonomous electric rolling stock" (state registration number 0115U002567) and departmental research theme no. 03418 "Research of the system of prediction of energy efficiency and diagnostics of high-voltage equipment", as well as the plans of LLC "NDI Peretvoryuvach" for the production of converters for traction gears of rolling stock and industrial electric drives of direct and alternating current.

The analysis of the current state of the Ukrainian electric rolling stock revealed significant wear (up to 90%) and outdated technical solutions for traction transmission. It was found that modernisation of traction systems is necessary to reduce energy and operating costs, especially under limited economic resources. To solve this problem, a new modernized scheme for pulse control of the speed of DC motors of series excitation is proposed. The scheme is based on the principle of contactless change in the structure of power circuits during the period of modulation of the armature or excitation current, which can significantly improve the energy characteristics of motors.

It is shown that, due to the significantly higher time constant of the excitation winding and a special connection scheme for the bypass diode, the motor excitation current is almost constant and its value reaches the amplitude of the pulsating armature current. This increases the average torque of the motor, reduces torque pulsations, and accordingly reduces additional losses in the excitation winding core.

Operational algorithms for the new scheme in starting, steady-state, and braking modes were developed, forming the basis for simulation computer models.

Computer simulation models were developed, allowing the investigation of electromagnetic and thermal processes in the scheme and defining requirements for selecting parameters of semiconductor devices.

A comprehensive computer model was created to investigate thoroughly the electromechanical processes in the proposed scheme and identify the main operating modes of series-excited DC motors. The simulation results were experimentally confirmed on a specially constructed laboratory stand with a 3.8 kW DC motor. It was experimentally established that the proposed scheme increases the average torque by 5-7%, depending on the state of the motor's magnetic system.

Recommendations for constructing traction transmissions during modernisation and future energy-efficient traction transmissions for DC electric trains were provided.

The potential for effective dynamic braking with nominal torque at speeds down to 8% of nominal speed was separately investigated. This ensures high controllability of electric trains in braking modes and reduces electricity consumption compared to traditional schemes. It is shown that in the braking mode, according to an algorithm that provides a constant braking current with the possibility of energy recovery into the grid, the circuit provides a constant armature current and electromagnetic torque during braking with energy recovery into the grid and a rheostatic characteristic at the final braking section. The features of semiconductor devices operation in this mode are determined.

Additionally, a fast-acting wheel slip protection algorithm was developed based on controlling the difference in rotational speeds of motors. It is shown that in order to prevent the wheelset from boxing, it is necessary to reduce the electromagnetic torque of the electric motor driving it. For a DC motor with a series connection scheme, the electromagnetic torque is directly proportional to the armature current, so to reduce the electromagnetic torque it is sufficient to reduce the motor armature current by shunting the motor armature with resistance using a power key. To evaluate the effect of the resistance in reducing the armature current, taking into account the effect of the traction motor's anti-EMF, a substitution scheme is considered. The dependencies of the values obtained are plotted in relative units. The nominal current and the armature resistance of the traction motor are taken as the basic values. The developed algorithm effectively stabilizes motor speed differences within 0.06% of nominal speed within 4-20

modulation cycles, significantly enhancing the reliability and safety of electric train operation.

A comparative analysis of the proposed scheme with alternative promising traction transmissions, particularly based on asynchronous motors, was conducted. It was shown that the modernized DC traction transmission scheme is economically advantageous for suburban electric trains due to a higher integral efficiency coefficient (3-5% higher than asynchronous motors). This makes the efficiency of the motors approximately the same, eliminating one of the main disadvantages of a pulse-controlled DC motor. The paper presents a comparative analysis of the characteristics of the two electric traction drive systems.

Additionally, promising schemes and algorithms for auxiliary power converters of electric trains were investigated. Recommendations for their circuit implementation, ensuring stable operation of equipment under significant fluctuations in overhead line voltage, were provided. It is shown that the proposed solutions for modernising auxiliary power supplies, which are part of the electric drive, make it possible to increase the useful auxiliary power by 7-10 kW (27÷33%) without increasing power consumption from the grid, thereby improving comfort in the cabin section, reducing noise and vibrations, and implementing additional air cooling. The paper considers schemes and algorithms for constructing a converter for auxiliary needs under fluctuations in the input voltage of the traction network. As a result of the analysis, a cascade scheme with voltage stabilization before each stage is recommended. The algorithm allows optimising the transformer parameters in terms of weight, with the installed power equal to the nominal mode, namely three times less than in algorithms without input voltage stabilization. The key allows shunting the emergency inverter and, accordingly, ensuring the operation of the converter in case of failure of one of the inverters.

The developed technical solutions were implemented in production at LLC “NDI Peretvoryuvach” (Zaporizhzhia) during the modernization of the ChM1 electric locomotive, the drive systems of a 60-ton bridge crane at AlchevskMetallurgicalPlant, and in creating an auxiliary power converter for the DEL-02 diesel train manufactured

by PJSC “Luganskteplovoz”. The results were integrated into the educational process of National University “Zaporizhzhia Polytechnic” for training students specializing in 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics".

The main research results were published in 11 scientific papers, including 9 in specialized publications in Ukraine and abroad, indexed in international scientometric databases Scopus and Web of Science, and presented at 6 international and national scientific-practical conferences.

Keywords: pulse converter, traction motor, DC, series excitation, parallel excitation, rotational speed, computer model, physical model, asynchronous motor, semiconductor device.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:
Статті у міжнародних виданнях та у виданнях, які включено до науково-метричних баз:

1. Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., **Shylo S.**, Shkarupylo V. (2019). Method of artificial neural network synthesis for using in integrated CAD // 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM 2019) : proceedings. – 2019. – No. 8779248. – P. 24–29. – DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779248. – (Scopus, Web of Science) (*Особисто здобувачем: розроблено та адаптовано систему тестування модифікованого генетичного алгоритму*).

2. Korotun A., Moroz H., Titov I., Reva V., **Shilo S.** Optical properties of the ensembles of the spherical nanoparticles, embedded into the thin-film solar cell // 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2024) : proceedings. – 2024. – ISBN 979-835036817-8. – ISSN 2377-6935. – DOI: 10.1109/ELNANO63394.2024.10756911. – (Scopus) (*Особисто здобувачем: розроблена методика розрахунку частотних залежностей випромінювальної ефективності, коефіцієнтів поглинання, розсіювання та відбивання*).

Статті у фахових виданнях України:

3. Жорняк Л. Б., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Застосування теорії розмірностей до опрацювання експериментальних даних під час температурних досліджень електричних апаратів // Електротехніка та електроенергетика. – 2002. – № 1. – С. 41–47. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем: запропонована методика застосування системи обробки даних при обробці температурних режимів роботи електричних апаратів*).

4. Жорняк Л. Б., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Програма визначення часових параметрів нагріву комплектних пристроїв під час прискорених теплових випробувань // Електротехніка та електроенергетика. – 2003. – № 2. – С. 51–54. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем: розроблено програмне забезпечення визначення параметрів нагрівання при теплових випробуваннях*).

5. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко О. О. Дослідження теплових режимів роботи силового модуля імпульсного стабілізатора напруги // Вісник КДПУ. – 2006. – № 4. – С. 85–88. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем: розроблена методика моделювання роботи перетворювача в режимі реального часу з врахуванням теплових режимів роботи кристалів силового модуля*).

6. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко О. О., Немудрий І. Ю. Дослідження динаміки серієсного електродвигуна з різними імпульсними схемами регулювання // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 4–8. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем: запропонована модернізована схема тягової передачі з ДПЗ, яка відрізняється від класичної включенням допоміжного діоду у сумісне коло якоря та обмотки збудження, та імітаційна модель нової схеми*).

7. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко А. О., Немудрий І. Ю. Дослідження перехідних режимів під час послідовного з'єднання серієсних електродвигунів постійного струму // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – № 1. – С. 10–16. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.).

(Особисто здобувачем: розроблена ефективна система керування для режиму буксування колісних пар, яка базується на удосконаленій схемі регулювання струму тягових двигунів).

8. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко О. О., Шевченко Н. М. Дослідження реостатно-рекуперативного гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 2. – С. 6–9. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблена імітаційна модель, яка дозволяє проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в двигуні постійного струму з послідовним збудженням в режимі динамічного гальмування та визначено вимоги до граничних параметрів роботи елементів схеми).*

9. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко О. О. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 51–58. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблені імітаційні моделі, які дозволяють досліджувати електромеханічні процеси в двигуні постійного струму з послідовним збудженням).*

10. Василевський В. В., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Застосування нейронних мереж для прогнозування вологості ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – № 2. – С. 8–12. – DOI: 10.20998/2079-3944.2019.2.02. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar, Crossref та ін.). *(Особисто здобувачем: запропоновано використання методу нейромереж для прогнозування стану вологості ізоляції лінійних (масляних) трансформаторів, що забезпечує його ремонт не за жорстким графіком, а згідно з дійсним станом ізоляції).*

11. Андрієнко Д. С., **Шило С. І.** Оцінка доцільності використання напівпровідникових перетворювачів для живлення власних потреб електропоїздів постійного струму // Економічний аналіз. – 2024. – Т. 34, № 3. – С.

447–453. (*Особисто здобувачем: визначено базові критерії оцінки можливості заміни електромашинних перетворювачів на напівпровідникові; запропоновано використання уніфікованих рішень при модернізації електропоїздів та електропотягів постійного струму*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

Тези і матеріали наукових конференцій:

12. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Дослідження режимів гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна при низьких частотах обертання // Енергозбереження на залізничному транспорті : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 30 травня – 02 червня 2012 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2012. – 82 с. – С. 3. (*Особисто здобувачем: застосована імітаційна модель, яка дозволяє проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в двигуні постійного струму з послідовним збудженням в режимі динамічного гальмування при низьких частотах обертання*).

13. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., **Шило С. І.**, Немудрий І. Ю. Порівняльний аналіз схемних рішень стабілізованої тягової підстанції постійного струму // Електрифікація транспорту «Транселектро 2009» : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (Місхор, 03–05 червня 2009 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2009. – 77 с. – С. 26. (*Особисто здобувачем: проведено аналіз і порівняння характеристик схемних рішень*).

14. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Аналітичний опис електромеханічних процесів вдосконаленої схеми імпульсного регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження // Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО–2010» : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Місхор, 27–30 вересня 2010 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2010. – 124 с. – С. 5. (*Особисто здобувачем: розроблено аналітичний опис електромеханічних процесів вдосконаленої схеми імпульсного регулювання*).

15. **Шило С. І.** Покращення електромеханічних характеристик серієсних електродвигунів засобами силової електроніки // Енергозбереження на

залізничному транспорті і в промисловості : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11–13 червня 2014 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2014. – 181 с. – С. 161–162.

16. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., **Шило С. І.**, Немудрий І. Ю. Імітаційна модель «Тягова підстанція – електрорухомий склад постійного струму» // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті (EMC&S–R) : тези IV Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпропетровськ, 15–19 лютого 2009 року). – Дніпро : ДПТ, 2011. – 98 с. – С. 8–9. (*Особисто здобувачем: проведено моделювання на розробленій моделі*).

17. **Шило С. І.** Швидкодіюча система захисту від боксування двигунів послідовного збудження // Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми ресурсозбереження в промисловості та на транспорті» : матеріали конференції (23–25 жовтня 2024 року, м. Харків). – Харків : ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. – 137 с. – С. 57–60.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	16
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РОЗВИТКУ І СУЧАСНОГО СТАНУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ	30
1.1 Сучасний стан електропоїздів в Україні.....	30
1.2 Аналіз принципів побудови систем електричної тяги електропоїздів.....	34
1.3 Аналіз сучасного стану в галузі силових напівпровідникових приладів.....	44
1.4 Вибір методів дослідження електромагнітних процесів.....	50
1.5 Постанова завдання дослідження	56
1.6 Висновки до розділу	56
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СХЕМИ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЇХ РЕЖИМІВ РОБОТИ	58
2.1 Принцип дії модернізованої схеми імпульсного керування.....	58
2.2 Схеми та математичні моделі режимів роботи модернізованої схеми.....	63
2.3 Рекомендації з реалізації модернізованої схеми тягової електропередачі електропоїздів постійного струму з ДПЗ.....	72
2.4 Висновки до розділу 2	73
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СХЕМИ	75
3.1 Порівняльний аналіз схем регулювання тягових ДПЗ	76

3.2	Дослідження режимів гальмування в модернізованій схемі ДПЗ на імітаційних моделях.....	85
3.3	Дослідження режиму буксування колісних пар тягового електроприводу з ДПЗ	90
3.4	Висновки до розділу 3	101
РОЗДІЛ 4 ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....		103
4.1	Побудова тягової електропередачі електропоїздів постійного струму з асинхронними двигунами.....	104
4.2	Порівняльний аналіз модернізованої схеми з ДПЗ та з тяговим частотно-регульованим асинхронним приводом	109
4.3	Вибір типу напівпровідникових приладів	113
4.4	Напрямок модернізації перетворювачів живлення власних потреб	117
4.5	Дослідження теплових режимів роботи силового модуля імпульсного регулятора напруги	123
4.6	Висновки до розділу 4	132
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		134
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		138
ДОДАТКИ.....		148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

GTO (gate turn-off thyristor) – повністю керований тиристор

IGBT (insulated gate bipolar transistor) – біполярний транзистор з ізольованим затвором

IGCT (integrated gate-commutated thyristor) – повністю керований тиристор з інтегрованим затвором

ДПЗ – електродвигун послідовного збудження

ДПС – двигун постійного струму

ДС – давач струму

ЕРС – електрорушійна сила

ІП – імпульсний перетворювач

ККД – коефіцієнт корисної дії

НБД – науково-метрична база даних

ТАД – тяговий асинхронний двигун

ТЕД – тяговий електродвигун

ШІР – широтно-імпульсний регулятор

ВСТУП

Актуальність теми. Важливим напрямом ефективного вдосконалення технічних і економічних характеристик систем тягової електропередачі є впровадження сучасних досягнень силової напівпровідникової і мікропроцесорної техніки. Особливо це стосується електропоїздів українських залізниць, де наразі в експлуатації використовуються високовольтні контактнорезистивні пускові тягові пристрої та електромашинні високовольтні перетворювачі для живлення кіл власних потреб.

Проектуванням і дослідженням тягового електроприводу в тому числі рухомого електричного складу, статичних напівпровідникових перетворювачів для тягових електротехнічних комплексів займаються багато відомих організацій та фірм, зокрема ВАТ Холдингова компанія «Лугансктепловоз» (м. Луганськ), Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій (м. Дніпро), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Estel (Естонія), Siemens (Німеччина), АВВ (Швейцарія), Westinghouse Electric Corp. (США), Ansaldo Transporti (Італія), Hitachi (Японія) та ін. Цій проблемі присвячені наукові праці таких відомих учених, як В. Е. Розенфельд, В. П. Феоктістов, Г. К. Гетьман, М. В. Панасенко, А. М. Муха, В. І. Омеляненко, В. В. Літовченко, О. Р. Чаусов, С. І. Вольський, Л. В. Бірзнієкс, І. П. Ісаєв, Г. Г. Басов, В. І. Носков, І. Я. Ранькис, О. М. Сінчук, М. М. Акодїс, F. C. Lee (США), I. Smith (Великобританія), O. Wasynczuk (Індія), R. Hoft (США), Т. Міяшита (Японія), J. Biess (США) та інші.

Сучасна тенденція розвитку електрорухомого складу в зв'язку з значним поширенням впровадження силової напівпровідникової електроніки пов'язана з широким використанням асинхронного тягового електроприводу і створенням швидкісного електротранспорту. Ця тенденція підтверджується розробкою та виробництвом сучасних електроприводів закордонними фірмами (Alston, Siemens, АВВ, Hyundai та інші) в тому числі вітчизняними (Крюківський

вагонобудівний завод (двосистемний електропоїзд ЕКр-1 «Тарпан»); ТОВ НДІ «Перетворювач», ДП «Електровагонмаш», Луганський тепловозобудівний завод (дизель-поїзд ДЕЛ-02)).

В Україні експлуатуються 325 електропоїздів, з них близько 200, які не використали визначений термін служби, і на всіх електропоїздах є моторні візки з двигунами постійного струму [1, 2]. Наявна практика капітальних ремонтів електропоїздів в Україні передбачає їх часткову модернізацію: осучаснення салонів вагонів та кабін машиністів і заміну застарілого обладнання, в основному джерел живлення власних потреб на сучасні. З погляду підвищення енергетичної ефективності електропоїздів постійного струму доцільно впроваджувати імпульсне регулювання струму якірних кіл двигунів, що дозволить економити до 15% електроенергії на тягу [3].

Розвиток швидкісного руху потребує підвищення пропускнув спроможності тягових мереж, особливо це стосується тягових мереж постійного струму. Новітні дослідження показують, що при напрузі контактної мережі 18-35 кВ побудова мереж постійного струму потребує на 20-30% менше капіталовкладень порівняно з побудовою мереж змінного струму [3].

Перехід із мереж постійного струму 3 кВ на змінний 25 кВ потребує витрат від 60% до 80% від побудови нової лінії [3]. Для України нині з економічного погляду це неможливо.

З огляду на підвищення напруги мережі постійного струму необхідна розробка нових концепцій побудови тягових мереж і комплексу тягового електрообладнання. Вказана проблема може бути частково реалізована поступовими кроками підвищення напруги мережі постійного струму до 4-6 кВ з використанням запасу по ізоляції мережі 3 кВ (стан ізоляції 6 кВ) [3] з подальшим використанням інверторно-трансформаторних схем (eTransformer) [4].

Отже, для України доцільно:

– для першого етапу модернізації впровадити імпульсне регулювання двигунів постійного струму;

– для другого етапу – впровадити інверторно-трансформаторні перетворювачів на електропоїздах та частотно-регульованих тягових електроприводів;

– для третього етапу – впровадити частотно-регульований тяговий електропривод передусім швидкісних електропоїздів.

Тому виникає науково-технічне завдання в дослідженні і розробці енергоефективного комплектного тягового електрообладнання електропоїздів постійного струму на базі сучасних досягнень в галузі напівпровідникових приладів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних і електронних апаратів Національного університету «Запорізька політехніка» відповідно до тематичного плану наукових досліджень за держбюджетною темою ДБ 03715 «Енергоощадне керування експлуатаційними характеристиками та параметрами систем електричної тяги автономного електрорухомого складу» (номер держреєстрації 0115U002567) та кафедральною науковою темою №03418 «Дослідження системи прогнозування енергоефективності та діагностики високовольтного обладнання», а також планів ТОВ «НДІ Перетворювач» зі створення перетворювачів для тягових передач рухомого залізничного транспорту і промислових електроприводів постійного та змінного струму.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка та дослідження алгоритмів роботи, засобів технічної реалізації, спрямованих на підвищення техніко-економічних показників тягових високовольтних перетворювачів електропередачі електропоїздів.

Для досягнення вказаної мети виконані такі завдання.

1. Аналіз існуючих і перспективних принципів побудови тягових високовольтних електротехнічних комплексів залізничного транспорту з двигуном постійного та змінного струмів.

2. Розробка системи енергоефективного імпульсного регулювання модернізованого тягового електроприводу постійного струму, що забезпечує покращення статичних та динамічних характеристик приводу.

3. Розробка нових алгоритмів керування та комп'ютерних моделей аналізу режимів роботи модернізованої схеми тягового електроприводу в середовищі вибраного пакету прикладних програм.

4. Аналіз електромеханічних процесів є розробленому високовольтному електротехнічному комплексі в статичному та динамічному режимах на комп'ютерних моделях.

5. Оцінка перспективних напрямків розробки та модернізації тягової електропередачі та перетворювачів власних потреб електропоїздів постійного струму.

6. Експериментальна перевірка на макетному зразку отриманих розрахунково-теоретичних положень і результатів комп'ютерного моделювання.

Об'єктом дослідження є електромеханічні процеси в тягових електропередачах електропоїздів постійного струму.

Предметом дослідження є алгоритми та схемотехнічні рішення формування нестационарних режимів тягових електропередач.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі методами дослідження при вирішенні поставлених завдань стали загальноприйняті в електротехніці і теорії електричних ланцюгів аналітичні методи і сучасні засоби комп'ютерного моделювання із застосуванням спеціалізованого пакету прикладних програм MatLab.

Достовірність теоретичних положень, отриманих результатів комп'ютерного моделювання підтверджена експериментальними дослідженнями на виготовлених макетних зразках та стендах ТОВ «НДІ «Перетворювач».

Наукова новизна отриманих результатів:

Основні теоретичні здобутки проведеної дослідницької роботи:

1. Вперше:

– розроблені та досліджені нові алгоритми, що дозволяють методом змінної структури імпульсного перетворювача, на відміну від існуючих, формувати статичні та динамічні характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням аналогічних двигунів з незалежним збудженням без застосування допоміжних джерел живлення та підвищити техніко-економічні показники тягового електроприводу;

– розроблено алгоритм, який дозволяє засобами силової електроніки в тяговому перетворювачі зі змінною структурою реалізувати швидкодіючий захист від режимів ковзання та буксування послідовно з'єднаних двигунів послідовного збудження, що сприяє покращенню тягових характеристик приводу;

– методом комп'ютерного моделювання досліджено новий алгоритм захисту від ковзання ходових коліс тягового приводу та отримані нові залежності параметрів двигунів (струму, напруги, швидкості) від коефіцієнта зчеплення.

2. Отримали подальший розвиток:

– методика порівняльного вибору напівпровідникових приладів, яка, на відміну від існуючої, враховує реальні коефіцієнти теплового стану та втрати потужності;

– метод дослідження теплових процесів систем напівпровідник-охолоджувач, який, на відміну від існуючих, враховує повну модель конструкції охолоджувачів, яка входить у модель імпульсного перетворювача.

Практична цінність роботи:

– досліджені нові алгоритми, які дозволили запропонувати нову схему імпульсного перетворювача зі змінною структурою для тягового електроприводу з двигуном послідовного збудження для електропоїздів постійного струму, яка дозволяє сформувати його статичні та динамічні характеристики аналогічні приводам з двигуном постійного струму з незалежним збудженням, на відміну від існуючих, без допоміжних джерел живлення обмотки збудження, що дозволяє

підвищити на 1-5% пусковий момент, забезпечити гальмування з постійним моментом до швидкості приблизно 8% від номінальної та підвищити техніко-економічні показники в цілому;

- розроблено комп'ютерну модель та досліджено швидкодіючу схему захисту від буксування та надані рекомендації до схеми модернізованої електропередачі з імпульсним регулюванням моторних вагонів електропоїзда;

- розроблено і виготовлено випробувальний стенд та проведені експериментальні дослідження працездатності та достовірності комп'ютерної моделі запропонованої модернізованої схеми імпульсного перетворювача;

- проведено порівняльний аналіз модернізованої схеми імпульсного перетворювача з перспективними схемами з частотно-регульованим асинхронним двигуном;

- надані рекомендації щодо шляху реалізації модернізації тягового електроприводу електропоїздів з урахуванням сучасного економічного стану України;

- основні результати роботи використані ТОВ НДІ «Перетворювач» при розробці проєктів модернізації тягового електроприводу з ДПЗ електровозу ЧМ1, механізмів переміщення мостового крану вантажопідйомністю Алчевського меткомбінату та при реалізації перетворювача власних потреб дизель-поїздів ДЕЛ-02 виробництва ПАТ «Луганськтепловоз»;

- результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес Національного університету «Запорізька політехніка» під час викладання дисциплін: «Регулювання та керування електромеханічних систем»; «Основи силової електроніки»; «Силкові електронні пристрої енергоємних виробництв».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом самостійної роботи автора. Усі наукові результати отримані здобувачем самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особисто дисертанту належить: [1] методика застосування системи обробки даних при обробці температурних режимів роботи електричних апаратів; [2] програмне забезпечення визначення параметрів нагрівання при теплових випробуваннях; [3] методика моделювання роботи перетворювача в режимі реального часу з врахуванням теплових режимів роботи кристалів силового модуля; [4]

запропонована модернізована схема тягової передачі з ДПЗ, яка відрізняється від класичної включенням допоміжного діода в сумісне коло якоря та обмотки збудження, що дозволяє формувати характеристики ДПЗ аналогічні двигунам з незалежним збудженням без застосування допоміжного джерела живлення, та імітаційна модель нової схеми; [5] ефективна система керування для режиму буксування колісних пар, яка базується на удосконаленій схемі регулювання струму тягових двигунів; [6] імітаційна модель, яка дозволяє проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів у серієсному двигуні постійного струму в режимі динамічного гальмування та визначено вимоги до граничних параметрів роботи елементів схеми; [7] імітаційні моделі, які дозволяють досліджувати електромеханічні процеси в серієсному двигуні постійного струму; [8] запропоновано використання методу нейромереж для прогнозування стану вологості ізоляції лінійних (масляних) трансформаторів, що забезпечує його ремонт не за жорстким графіком, а згідно з дійсним станом ізоляції; [9] розроблено та адаптовано систему тестування модифікованого генетичного алгоритму; [10] методика розрахунку частотних залежностей випромінювальної ефективності, коефіцієнтів поглинання, розсіювання та відбивання; [11] визначено базові критерії оцінки можливості заміни електромашинних перетворювачів на напівпровідникові; запропоновано використання уніфікованих рішень при модернізації електропоїздів та електропотягів постійного струму.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися здобувачем та обговорювались на 6 конференціях, серед них: IV Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту Транселектро-2010» (м. Місхор, 18–22 вересня 2010р.); V Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (сmt. Воловець, Закарпатська обл., 11–13 червня 2014 р.); VII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2014» (м. Дніпро, 23–26 жовтня 2014 р.); 15th International Conference on the Experience of Designing and

Application of CAD Systems, CADSM 2019, Polyana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine, 26 February – 2 March, 2019; Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми ресурсозбереження в промисловості та на транспорті» (м. Харків, 23–25 жовтня 2024 року).

Публікації. Матеріали дисертації відображені в 11 публікаціях, зокрема: 9 статей у фахових наукових виданнях, що входять до міжнародних НБД; 2 статті в матеріалах міжнародних конференцій (індексуються в НБД Scopus та Web of Science).

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку джерел із 83 найменувань, трьох додатків з актами впровадження та описом експериментального стенда. Загальний обсяг дисертації – 156 сторінок, включаючи 5 таблиць, 53 рисунка.

Зміст роботи: у вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, показано об'єкт і предмет дослідження, наукові положення, наукову і практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок автора в результатах публікацій, структура та обсяг роботи.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану дослідження та реалізації електроприводів постійного та змінного струмів для залізничного транспорту. Проведено огляд принципів їх побудови та методів дослідження. Встановлено, що на наявному рухомому складі українських залізниць постійного струму для регулювання швидкості обертання тягових електродвигунів використовується реостатно-контакторне керування, яке має багато недоліків, а саме: наявність значної кількості контакторної апаратури, великі втрати електроенергії в режимі пуску, пульсації крутного моменту в момент пуску приводу, залежність швидкості від крутного моменту на валу тягових електродвигунів, складність у реалізації систем захисту від буксування та юзу. Основним напрямком усунення вказаних недоліків є проведення модернізації тягових передач із застосуванням напівпровідникових перетворювачів. Існує ряд розробок, які дозволяють проводити вказану модернізацію, проте кожна з них має

свої переваги та недоліки, зумовлені або значною кількістю напівпровідникових приладів у схемі, і відповідно складністю конструкції, або ж при спрощенні силової схеми виникала необхідність залишати додаткові джерела живлення обмоток збудження в режимах реостатного та рекуперативного гальмування.

Сформульована постановка науково-практичної задачі зі створення енергоефективної схеми імпульсного регулювання швидкості обертання тягових двигунів постійного струму послідовного збудження, які б мали властивості, аналогічні схемам з двигунами паралельного або змішаного збудження без допоміжних джерел живлення та побудови перспективних схем тягової електропередачі.

У другому розділі наведено опис принципу дії нової вдосконаленої силової схеми тягової електропередачі з двигуном послідовного збудження, що дозволяє без допоміжних джерел живлення формувати у ДПЗ характеристики, аналогічні двигунам з незалежним збудженням у режимах пуску і гальмування, розроблено алгоритм її роботи. На підставі принципу дії та нових алгоритмів запропоновано комп'ютерні моделі, які дозволяють проводити аналіз процесів у тяговій електропередачі.

Виявлені особливості режимів роботи елементів схеми та розроблені рекомендації з побудови схем тягового електроприводу з ДПЗ електропоїздів постійного струму.

У третьому розділі проведено аналіз і дослідження електромагнітних процесів в тяговій передачі електропоїздів постійного струму. Досліджено особливості електромагнітних процесів з використанням комп'ютерної моделі в розробленій за участю автора модернізованій силовій схемі тягової електропередачі з двигуном послідовного збудження.

На розроблених моделях було проведено дослідження режиму пуску модернізованої схеми при частотах комутації силового ключа в діапазоні від 300 до 2000 Гц. Показано, що зниження рівня пульсацій струму збудження досягається при введенні в якірне коло допоміжних діодів.

Порівняльний аналіз класичної схеми імпульсного регулювання і модернізованої схеми засвідчив підвищення пускового моменту на 5-7 відсотків залежно від стану магнітної системи.

Встановлено, що отримані залежності показують можливість реалізації режиму електродинамічного гальмування електродвигуна без застосування додаткових джерел струму обмотки збудження ДПЗ. Також був виконаний аналіз режимів роботи силових елементів схеми під час роботи схеми в режимі електродинамічного гальмування і вказано на особливості вибору граничних параметрів струмового навантаження шунтуючих діодів.

Показано, що використання модернізованої схеми імпульсного регулювання швидкості обертання ТЕД створює передумови реалізації ефективної антибоксовальної системи для рухомого складу залізниць постійного струму.

Проведено порівняння результатів комп'ютерного моделювання з результатами, отриманими експериментальним шляхом з використанням засад фізичного моделювання на випробувальному стенді. Порівняльний аналіз результатів підтверджує обґрунтованість прийнятих практичних рекомендацій з розробки та використання удосконаленої схеми тягової передачі електропоїздів постійного струму та її комп'ютерних моделей.

У четвертому розділі проведено аналіз перспективних схем побудови тягової передачі для мереж 3-6 кВ постійного струму та аналіз інтегрального ККД тягового приводу з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором та двигуном постійного струму послідовного збудження. Показано, що номінальні ККД двигунів у сталому режимі руху з урахуванням модернізації їх статорних обмоток практично однакові й дорівнюють 94-95%, встановлена потужність та кількість напівпровідникових модулів практично однакова. Водночас інтегральний ККД асинхронного тягового електроприводу менше ніж привода з ДПЗ приблизно на 3-5%. Економічність модернізації визначається співвідношенням витрат на розробку та виготовлення перетворювача, вартість обслуговування колектора ДПЗ при експлуатації модернізованого двигуна ДПЗ.

Економічність побудов АД доцільно використовувати при побудові нових візків електропоїздів ($V \geq 120$ км/год) або модернізації наявних з урахуванням співвідношення витрат на вартість розробки перетворювача частоти, двигуна, моторного візка до експлуатаційних витрат нової електропередачі.

Розглянуті особливості теплових режимів роботи силового модуля імпульсного регулятора з використанням теплової моделі системи «напівпровідниковий прилад – навколишнє середовище» на прикладі перетворювача власних потреб ДЕЛ-02, показано можливості використання цієї методики при проектуванні системи охолодження для запропонованої автором удосконаленої схеми тягової передачі електропоїздів постійного струму.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РОЗВИТКУ І СУЧАСНОГО СТАНУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

1.1 Сучасний стан електропоїздів в Україні

Українська залізниця відіграє важливу роль у реалізації приміських пасажирських перевезень. Своєчасність і надійність приміських перевезень забезпечують насамперед електропоїзди та дизель-поїзди.

Виконання надійних перевезень залежить від стану рухомого складу, а собівартість – від експлуатаційних витрат, зокрема їх енергоефективності.

Історично склалося так, що в Укрзалізниці існує дві системи живлення: 3 кВ постійного струму і 25 кВ змінного струму. Перехід на живлення рухомого складу змінного струму зумовлюється тривалим строком окупності (до 15 років) і значними матеріальними витратами при перебудові ліній постійного струму [3].

Завдяки наявній реалізації систем електроживлення в Україні експлуатуються електропоїзди постійного та змінного струму. Станом на 2010 рік в Україні перебувало в експлуатації понад 325 електропоїздів [1, 2].

У табл. 1.1 наведено наповнення парку електропоїздів в Україні.

Аналіз табл. 1.1 показує, що понад 50% електропоїздів постійного і змінного струму експлуатуються понад нормативно встановлений термін служби (28 років). Електропоїзди EP2 у кількості 36 поїздів працюють із подовженим терміном служби, їх мали списати у 2006–2010 роках.

На всіх електропоїздах встановлені комплекти електрообладнання виробництва Ризького електромеханічного заводу, Латвія. Електропоїзди EP2 обладнані серієсними двигунами постійного струму на напругу 1500 В. Пуск і регулювання швидкості контактено-реостатне. Рекуперативне та реостатне гальмування відсутнє. Електропоїзди EP2Т (EP2Р) мають серієсні тягові двигуни постійного струму з напругою 750 В, що забезпечує їм такі переваги перед електропоїздами EP2:

- знижено вдвічі напругу на колекторах, що підвищує ККД і надійність тягових двигунів;
- впроваджено рекуперативно-реостатне гальмування;
- відсутнє перегрупування тягових двигунів, що знижує кількість електрообладнання, спрощує схему силових кіл, підвищує надійність електропоїздів.

Таблиця 1.1 – Парк електропоїздів України

Вид живлення	Рік випуску \Тип	EP1	EP2	EPЛ2Т	ET2	Всього
Електропоїзди постійного струму	1960–1970	21	51			72
	1971–1980		19			19
	1981–1990		51			51
	1991–2000		11		3	14
	2001–2016		1	36		37
	Всього	21	133	36	3	193
Електропривод змінного струму	Рік випуску \Тип	EP9	EPЛ9		ED5	Всього
	1960–1970	8				8
	1971–1980	84				84
	1981–1990	28				28
	1991–2000	9				9
	2001–2016	2	15		7	24
	Всього	131	15		7	153
Швидкісні двосистемні електропоїзди 25/3кВ	Рік випуску \Тип	EJ575	EKp1 «Тарпан»		HRCS2	Всього
	2012	2	2		10	14
	2013				3	3
	Всього	2	2		13	17

Електропоїзди вітчизняного виробництва ЕПЛ2Т (ХК «Луганськтепловоз») є прототипами, відповідно, модифікацією електропоїздів ЕР2Т [5].

Суттєвими недоліками поїздів постійного струму є:

- значні втрати електроенергії в пускових реостатах, що становить до 15% від загальних витрат на тягу;

- рекуперативне гальмування електропоїздів ЕР2Т при швидкості менше 50 км/год малоефективне [6];

- живлення власних потреб відбувається від електромашинних перетворювачів потужністю до 15 кВт із ККД близько 50-60%.

При модернізації електропоїздів, капітальному ремонті, потужність власних потреб цих перетворювачів недостатня за потужністю й рівнем напруги, що потребує додаткового встановлення статичних перетворювачів потужністю 20 кВт 3 кВ для живлення електрообладнання при модернізації кабіни машиніста, як це було зроблено на електровозах ВЛ40.

У електропоїздів змінного струму використовується ступінчасте регулювання напруги тягових випрямлячів на низькій стороні трансформатора. Гальмування електропневматичне (ЕР9П, ЕР9М) та електропневматичне й реостатне (ЕР9Е та ЕР9Т).

Живлення власних потреб у поїздах постійного струму виконується електромашинними перетворювачами, виконаними на базі високовольтних машин постійного струму й низьковольтного синхронного генератора.

Пуск цих перетворювачів виконується контакторно-реостатним способом. У цілому при потужності до 30 кВт (рівень навантаження власних потреб) ККД становить нижче 60%. Опалення здійснюється від напруги контактної мережі.

У поїздах змінного струму живлення власних потреб відбувається від допоміжних обмоток тягового трансформатора. Живлення компресорів здійснюється від електромашинного фазорозчеплювача РФ-18Д потужністю 18 кВт з ККД близько 60-70%.

Зважаючи на вищезазначене, доходимо до таких висновків.

1. У наявному парку електропоїздів електрообладнання, що забезпечує рух, сконструйована на рішеннях 1960–1970-х років, які морально застаріли, мають низькі енергопоказники, значні експлуатаційні витрати на обслуговування контакторної апаратури і колекторів електричних машин.

2. Основний парк електропоїздів постійного та змінного струму був поповнений у 1960–1990-х роках 262 потягами, що становить 78% від діючого парку. Поповнення парку становило в середньому 6-7 поїздів на рік. У 1991-2016 рік поповнення парку становило в середньому по 3 поїзди на рік й знизилося практично вдвічі, що пояснюється станом економічного потенціалу України.

Таким чином, збільшення зносу наявного парку і практично відсутнє надходження нових електропоїздів ставить ПАТ «Укрзалізниця» у критичне становище, ускладнюючи виконання приміських перевезень. Виправити ситуацію за рахунок дизель-поїздів у короткостроковому майбутньому не можливо, оскільки їх знос становить 90% [1].

Для забезпечення міських пасажирських перевезень ПАТ «Укрзалізниця» проводить часткову модернізацію поїздів, для яких настав термін капітального ремонту [7]. Водночас виконуються роботи з осучаснення інтер'єру салонів, кабіни машиністів, систем освітлення й безпеки руху.

Обмежена потужність систем живлення власних потреб електропоїздів не дозволяє впровадити кондиціонування кабіни машиністів та пасажирських салонів, що не відповідає сучасним вимогам до такого класу рухомого складу. Для реалізації швидкісних пасажирських перевезень у 2012–2013 роках було придбано 14 двосистемних електропоїздів EJ575 (Skoda), вітчизняного ЕКр1(2) «Тарпан» (Крюківського вагонобудівного заводу) й 13 електропоїздів HRCS2 (Hyundai Rotem), які мають сучасне електрообладнання [8]. Тягові асинхронні двигуни мають плавне регулювання швидкості за допомогою перетворювачів частоти, що забезпечує їх високу енергетичну ефективність.

Впровадження сучасних електропоїздів потребує значних капіталовкладень. Наприклад, при середній вартості одного електропоїзда

приблизно 30 млн доларів США заміна парка 100 електропоїздів потребує біля 3 млрд доларів США тільки для закупівлі. Окрім цього, для забезпечення експлуатації необхідно мати відповідні сучасним вимогам депо, як це було зроблено при закупівлі корейських електропоїздів HRCS2. Також потрібно провести перепідготовку обслуговуючого персоналу. Усе це потребує значних витрат, що практично виключає реалізацію термінового проєкту в умовах економічного стану України. Модернізація наявних електропоїздів з двигунами постійного струму при капітальному ремонті з використанням сучасної силової електроніки для імпульсного регулювання частоти обертання тягових електродвигунів (швидкості руху) дозволяє знизити практично вдвічі витрати на оновлення електропоїздів з суттєвим, до 10-15%, зниженням витрат електроенергії на тягу.

1.2 Аналіз принципів побудови систем електричної тяги електропоїздів

Аналіз, проведений вище, показує, що основний парк електропоїздів України базується на принципах побудови електричної тяги, розроблених у 1960–1970-х роках минулого століття, а саме на контактному-резистивному для поїздів постійного струму й ступінчастому перемикачню обмоток тягового трансформатора на низькій стороні для поїздів змінного струму.

Вказані методи реалізації пуску та регулювання швидкості руху мають суттєві недоліки:

- значна пульсація пускового моменту, що знижує силу тяги;
- значні втрати електроенергії;
- значна кількість пускової апаратури, що збільшує втрати на експлуатацію й зменшує надійність електричної передачі.

Як вказувалось раніше, в Україні, як і в інших країнах, існує в основному дві системи електричної тяги: від мережі 3 кВ постійного струму й 25 кВ 50 Гц змінного однофазного струму.

Доведено, що з точки зору техніко-економічних показників перевагу мають існуючі системи електричної тяги на змінному струмі [3].

Перейти з системи постійного струму на змінний струм з економічних причин майже не можливо, оскільки це потребує витрат приблизно 60-80% від вартості побудови нової лінії [14].

Реалізація системи постійного струму доцільна при напрузі контактної мережі 16-20 кВ. Роботи в цьому напрямку почалися на початку минулого століття з появою ртутних випрямлячів. Цей напрямок набув розвитку та реалізації з появою керованих напівпровідникових приладів [3, 9, 10, 11, 12]. До того ж вартість системи живлення тяги на постійному струмі стає нижче на 25-30% порівняно із живленням змінним струмом.

Принципово схему перетворення енергії при електричній тязі постійного струму з використанням тягових двигунів постійного і змінного струму можливо поділити на дві групи: з проміжною ланкою постійного струму й з проміжною ланкою змінного струму (рис. 1.1) [13].

До першої групи відносимо схеми рис. 1.1,а – рис. 1.1,в у яких постійний струм контактної мережі за допомогою імпульсного перетворювача DC/DC перетворюється в постійний струм змінної величини за рахунок імпульсного або частотно-імпульсного керування. Теоретичні основи роботи таких перетворювачів для тяги з двигунами постійного струму докладно наведені в узагальнювальних працях [13, 14, 15, 16, 17].

У [18] детально описані сучасні схеми реалізації імпульсних перетворювачів з урахуванням розвитку елементної бази напівпровідникових приладів для акумуляторів шахтних електровозів.

В Україні електропоїзди з імпульсним регулюванням швидкості або моменту тягових двигунів постійного струму відсутні.

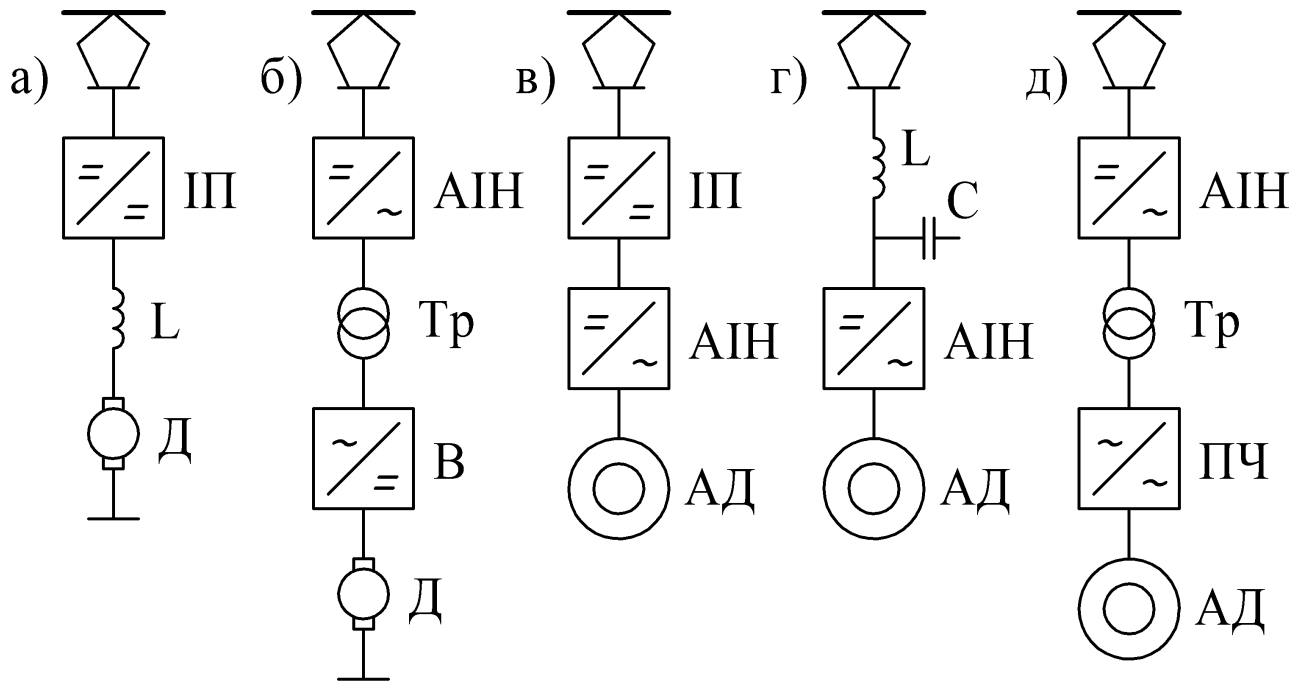


Рисунок 1.1 – Принципові схеми перетворення енергії електричної тяги постійного струму із статичними перетворювачами

У період 1965–1970 років Талліннський електротехнічний завод створив дослідні зразки тиристорних імпульсних перетворювачів потужністю 900–1500 кВт (ТИП-900/3, ТИП-1200/3, ТИП-1500/3) з напругою 3 кВ для електропоїздів типу ЭР-2 й ЭР-22, а також для контактнорно-акумуляторного поїзда СРЗ-А6МТ. Останніх було виготовлено в кількості 9 одиниць, які експлуатувалися на Прибалтійській залізниці [5].

Спрощена силова схема тягової передачі з перетворювачем типу ТИП-900/3 представлена на рис. 1.2.

Перетворювач ТИП-900/3 складається із вхідного індуктивно-ємнісного фільтра (L, C) й двох тиристорних ключів (UZ1 та UZ2). Ключі побудовані на тиристорах ТЛ-150-10 із примусовою комутацією, виконаною коливальним комутуючим контуром. Частота модуляції ключів становить 150-400 Гц, яка обмежена часом вимикання тиристорів – 200 мкс.

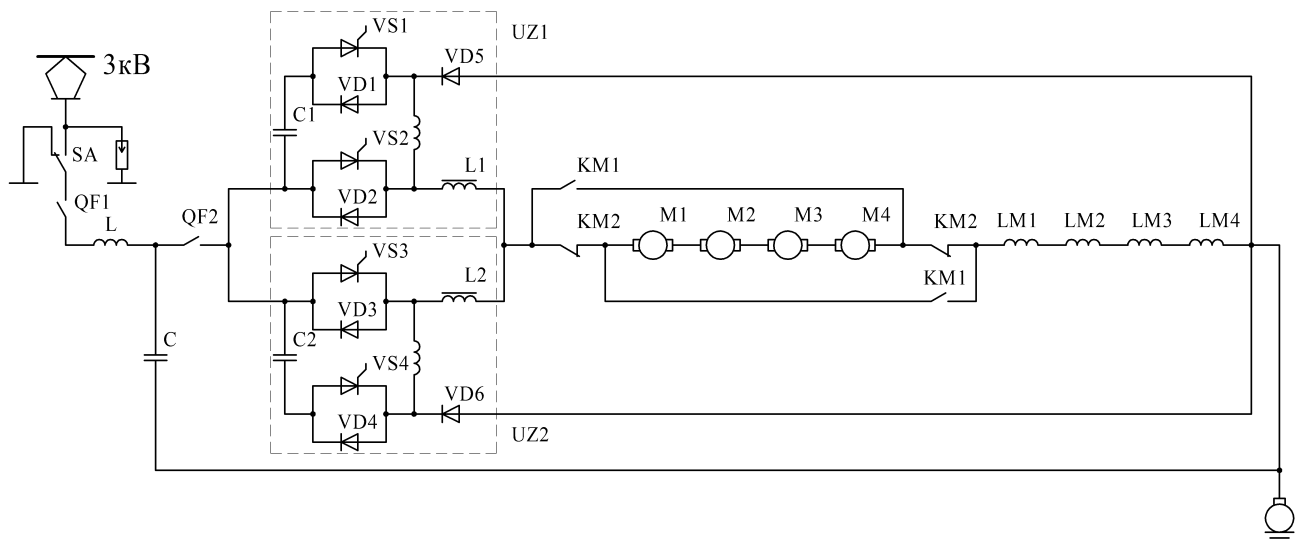


Рисунок 1.2 – Принципова силова схема моторного вагона електропоїзда ЭР-22 з тяговими двигунами 750 В із системою безреостатного пуску

Робота ключів UZ1 та UZ2 має зсув у часі, що сприяє збільшенню частоти модуляції вдвічі й відповідно зменшенню індуктивності й ємності вхідного фільтра. Перетворювач забезпечує безреостатний пуск електропоїзда. Однак високі габарити та вага перетворювачів стримували впровадження цих систем у серійне виробництво.

У 1982–1983 роках на електропоїзді ЭР-2 було випробувано електричне гальмування тягових двигунів із незалежним збудженням.

Як джерело незалежного збудження використано імпульсний перетворювач ТИП-1320 (виробник Талліннський електротехнічний завод). Проведені дослідження показали достатньо високу ефективність динамічного гальмування в діапазоні швидкостей 100–30 км/год. Було забезпечено рекуперативно-реостатне гальмування. Економія електроенергії за один цикл гальмування зі швидкості 100 км/год чотири вагонного поїзда склала 11,5 кВт/год. Розрахункова добова економія – 1150 кВт/год або 420 тис. кВт/год на рік.

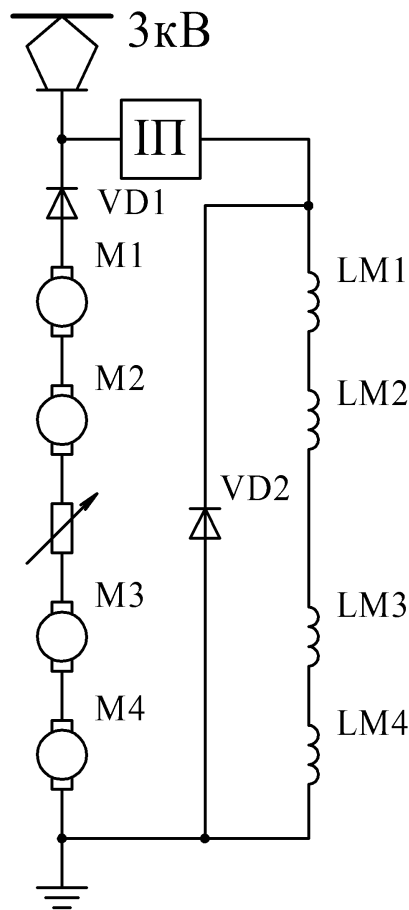


Рисунок 1.3 – Принципова силова схема рекуперативно-реостатного гальмування електропоїзда ЭР-2

Система імпульсного регулювання швидкості широко впроваджується в електропоїздах метрополітенів та тролейбусів. Аналогічні роботи проводились у 1960–1970 роках у ФРН, Японії, Англії тощо [17, 18, 19, 20, 21, 22].

З розвитком елементної бази, а саме появи GTO та IGCT тиристорів та IGBT транзисторів, з'явилась можливість реалізовувати електропоїзди з асинхронним двигунами (рис. 1.1,в та рис. 1.1,г). На схемі рис. 1.1,в імпульсний перетворювач ІП стабілізує напругу на вході автономного інвертора, який забезпечує частотне управління частотою обертання тягового двигуна. Наявність ІП дозволить зберегти стабільну вхідну напругу і встановити необхідний рівень напруги на вході АІН. Виходячи із можливості виникнення значних коливань напруги в контактній мережі [23] схема рис. 1.1,в дозволяє знизити клас напівпровідникових приладів у схемі АІН, що дає змогу знизити в них втрати енергії або підвищити частоту їх модуляції. Вказана схема використовується в

дослідних зразках, в яких АІН був виконаний на двоопераційних тиристорах із примусовою комутацією, що дозволяє реалізовувати управління асинхронним двигуном у режимах амплітудної і ШІМ модуляції [10]

З появою повністю керованих напівпровідникових приладів 45-60 класу з'явилась реальна можливість реалізувати принципи побудови електропоїздів постійного струму з асинхронним двигуном за схемою рис. 1.1,г. З використанням цих силових напівпровідникових приладів було побудовано електропоїзд ЕД6 потужністю 8000 кВт з асинхронними двигунами потужністю 400 кВт, що забезпечує прискорення $0,85 \text{ м/с}^2$ під час пуску. Питомі втрати електроенергії $21,5 \text{ кВтгод/тис. км}$. Принципи реалізації тягової електропередачі за схемами рис. 1.1,а та рис. 1.1,г в Україні застосовуються при розробці і виготовленні шахтних електровозів. Докладні роботи в цьому напрямку проведені під керівництвом д.т.н., проф. О.М. Сінчука [24, 25].

Паралельно з розвитком тягового асинхронного приводу електропоїздів постійного струму провідні іноземні підприємства широко використовують асинхронні тягові електроприводи в електропотязи змінного струму [5, 26].

Технічні рішення з удосконалення поїздів постійного і змінного струму з асинхронним тяговим приводом успішно інтегрувались у створенні двосистемних електропоїздів 25/3 кВ, які дозволяють суттєво покращити логістику пасажирських перевезень при двосистемних мережах живлення електричної тяги [3, 5]. Одночасно з цим проходить розробка швидкісних електропоїздів з максимальною швидкістю 250–350 км/год [5].

Поява високошвидкісних електропоїздів вимагає підвищення потужності на потребу електричної тяги до 20-25 МВт у номінальному режимі тяги. Докладні порівняння характеристик двосистемних електропоїздів наведені у [5].

Збільшення потужності на тягу електропоїздів [27] приводить до збільшення маси електрообладнання і відповідно до зростання навантаження на вісь. Існуючі електропоїзди мають навантаження на вісь до 16-18 тонн.

Збільшення потужності і швидкості електропоїздів спричиняє зростання втрат напруги з контактної мережі, що не дозволяє при наявних мережах

живлення електрорухомого складу реалізувати можливості швидкісного руху та призводить до збільшення втрат електроенергії в мережах.

Підвищення ефективності мережі живлення тяги вимагає збільшення перерізу їх струмопроводів, що потребує значних капітальних витрат і в перспективі не вирішує проблему.

Так, на майбутнє актуальним є підвищення напруги мережі живлення. Як вказувалось раніше, це питання почали розглядати в 1920–1940 роках, коли почалася ера виробництва іонних (ртутних) і електронних напівпровідникових приладів [3, 9]. Але суттєво вирішувати проблеми живлення тягових мереж підвищеною напругою почали декілька десятиліть тому, у період масового виробництва керованих напівпровідникових приладів з такими параметрами: напругою до 6 кВ й струмом до 3 кА.

У ряді досліджень було показано, що при напрузі контактної мережі постійного струму в діапазоні 18–35 кВ, витрати на будівництво на 25-30% менші ніж системи змінного струму [9, 10, 11].

Серед нових концепцій живлення електрорухомого складу постійного струму можливо виділити такі напрямки:

- реалізація енергетичного комплексу розподільчого тягового електроживлення і тягового електроприводу з асинхронним двигуном;
- реалізація комплексу тягового електрообладнання від мережі змінного струму з інверторними перетворювачами (електронними трансформаторами) [4].

Принципи розподільчого тягового електроживлення пояснюються на рис. 1.4,а та рис. 1.4,б [12, 14].

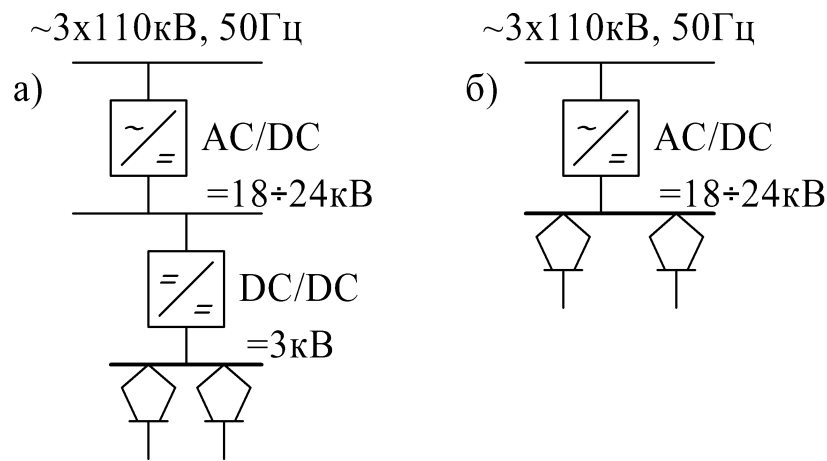


Рисунок 1.4 – Принципові схеми тягової мережі високої напруги

Далі за допомогою перетворювача DC/DC з колом проміжної високої частоти або імпульсного перетворювача напруга $18\div 24$ кВ перетворюється на 3 кВ і забезпечує підживлення існуючої мережі 3 кВ.

У схемі рис. 1.4,б перетворення змінної напруги 110 кВ у напругу постійного струму $18\div 24$ кВ відбувається перетворювачем AC/DC. Перетворення постійної напруги $18\div 24$ кВ здійснюється на електричному потязі за допомогою інверторного перетворювача та високочастотного трансформатора. Як мережу живлення $18\div 24$ кВ можна використовувати наявну мережу 25 кВ змінного струму, що дозволяє зменшити втрати напруги і енергії при збільшенні її потужності відносно дозволеної щільності змінного і постійного струмів.

Таким чином, високовольтна частина $\sim 110/24$ кВ уніфікована. Друга частина $24/3$ кВ постійного струму також уніфікована з різницею місця розташування обладнання на рис. 1.4,а на проміжній підстанції, а на рис. 1.4,б на електричному потязі.

Побудова за схемою рис. 1.4,б дозволяє реалізувати двосистемні потяги $24/3$ кВ постійного струму. Важливими перевагами розглянутої системи розподільчого живлення є високі ККД та електромагнітна сумісність тягової мережі 24 кВ, в якій наявна тільки частота модуляції перетворювачів частоти, що становить 1000–10000 Гц, і відповідно спрощує їх фільтрацію.

Як зменшення недоліків тягової мережі 3 кВ постійного струму досліджується можливість створення електронного трансформатора для потягів

змінного струму на напругу 15-25 кВ [4]. Реалізація цього напрямку в технічному плані збігається з реалізацією інверторного перетворювача для системи 24 кВ постійного струму для попереднього випадку.

У 2002 році компанія Alstom-LHB сумісно з холдингом залізниць Німеччини (DBAG) виготовляє дослідний зразок «e-Transformer» для дизель-потягу Lirex, що дозволяє йому працювати на неелектрифікованих та електрифікованих ділянках залізничного шляху.

Технологію «e-Transformer» розробила компанія Alstom-LHB (Зальнгіттер в Нижній Саксонії) у співробітництві з відділеннями компанії Alstom у Великобританії, Бельгії та Франції за участю компанії SMA-Regelsysteme (Німеччина) [4].

Принципову схему «e-Transformer», наведена на рис. 1.5. «e-Transformer», розроблено на заміну тягового трансформатора 1,5 МВт, 15 кВ, 16,7 Гц. Технічна характеристика нового трансформатора наведена в табл. 1.2.

Електронна частина вхідного кола «e-Transformer» виконана каскадним включенням 8 одиниць однофазних 4qs випрямлячів, які живлять відповідні напівмостові резонансні інвертори, що живлять первинні обмотки високочастотного трансформатора. Дві вторинні обмотки трансформатора за допомогою двох 4qs випрямлячів формують шину постійного струму 1650 В, яка живлять тягові інвертори трансформатора, виконані з феритовим осердям й вхідним дроселем, перебувають у баці з нержавіючої сталі. Вхідні перетворювачі «e-Transformer» виконані на IGBT модулях 65 класу й струмом 600А.

У перетворювачах на вторинній обмотці використані IGBT модулі 3,3кА.

Використання «e-Transformer» дозволить зменшити масу первинної ланки, габарити й втрати енергії вдвічі, порівняно з класичним однофазним трансформатором й 4qs перетворювачем.

У подальшому компанія Alstom планує використовувати «e-Transformer» в електропоїздах змінного струму на 25 кВ, 50 Гц.

Використання оливного охолодження за наявності в одному баці інвертора, високочастотного трансформатора, трансформатора і дроселя

потребує більш ретельного контролю якості оливи в умовах експлуатації і спеціальних методів контролю [28].

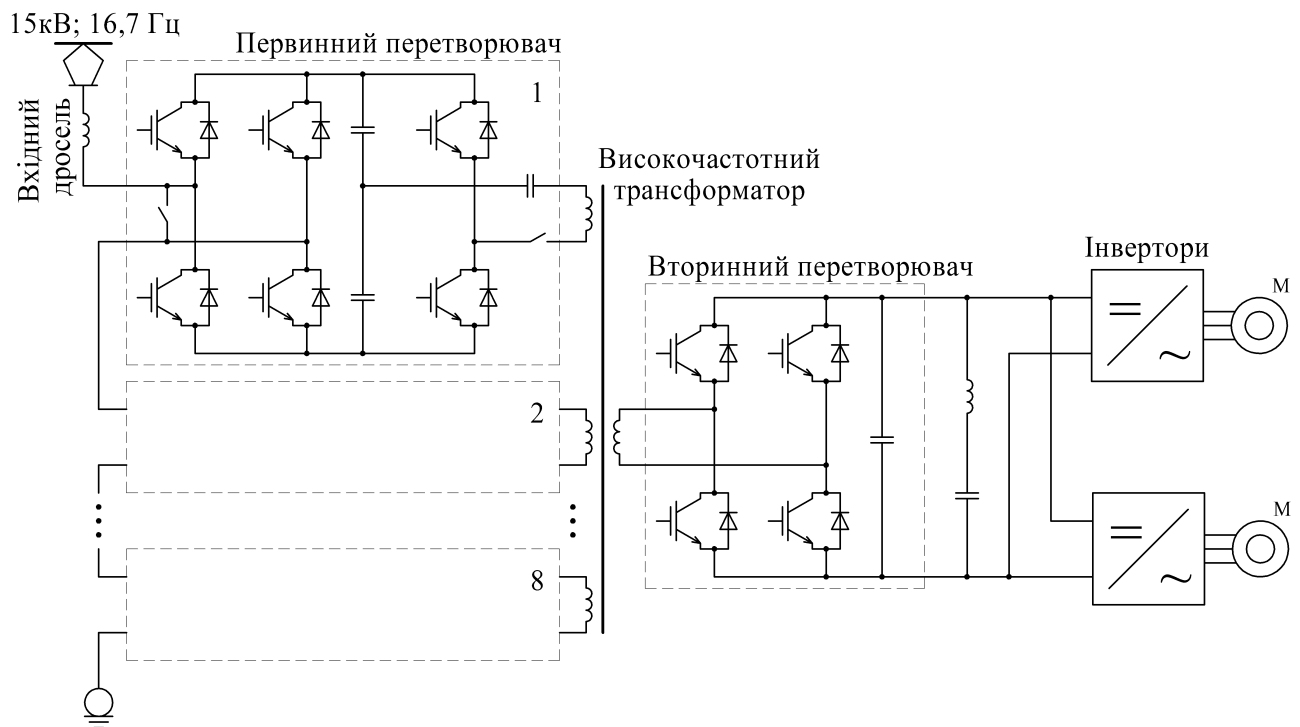


Рисунок 1.5 – Принципова схема системи «e-Transformer»: М – тягові двигуни, 1-8 – каскадні модулі

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики системи «e-Transformer»

№ з/п	Найменування параметра	Одиниця виміру	Величина параметра
1	Вхідна напруга	кВ	12-17,25
2	Вхідна частота	Гц	16,7
3	Вихідна напруга постійного струму	В	1650
4	Номінальна потужність	МВт	1,5
5	Потужність перевантаження	МВт	2,25
6	Робоча частота трансформатора	кГц	1,5
7	Маса	т.	
8	ККД	%	94
9	Номінальний струм дроселя мережі	А	110
10	Номінальна напруга каскадного модуля	В	1800
11	Маса подвійного модуля	кг	170
12	Габаритні розміри «e-Transformer»	мм	2430x2620x580

Перетворювачі енергії з проміжною ланкою змінного струму підвищеної частоти використовуються при реалізації перетворювачів власних потреб в електропоїздах і електровозах постійного струму.

На електропоїзді ЕД6 використано перетворювач потужністю 80 кВт для живлення власних потреб. Маса перетворювача 1100 кг, ККД 95%.

Запорізьким ПАТ «Перетворювач» виготовлено перетворювач ПП-ПО2ППТ-70/60/25-230/50/24-ТУЗ для живлення власних потреб модернізованої кабіни машиніста електровозу ВЛ11М: потужність 20 кВт, напруга контактної мережі 2000–4000В, маса 500 кг, габарити 1500x1000x520 мм, одностороннє обслуговування. Перетворювач має два класи напруги: змінний струм 220 В, 50 Гц та постійний струм 50В.

Для живлення електровозу 2ЕС4К використовується перетворювач ПСН-235-У2, який має масу 1500 кг при потужності 235 кВА, габарити 1832x2020x1084 мм. При напрузі живлення 2000-4000 В перетворювач має 4 інвертори потужністю 55–80 кВА трифазною напругою 380 В, частотою 50 Гц. Один інвертор 3x380 В, 50 Гц потужністю 30 кВА й один інвертор 1x600 В, 400 Гц, 23 кВА. Вхідні кола таких перетворювачів виконані на каскадних однофазних напівмостових або мостових інверторах підвищеної частоти і відповідному числі однофазних високочастотних трансформаторів, вихідні обмотки яких увімкнені паралельно через однофазні мостові випрямлячі, які, як правило, становлять шину постійного струму, яка живить інвертори для живлення споживачів бортової мережі.

1.3 Аналіз сучасного стану в галузі силових напівпровідникових приладів

В останнє десятиріччя спостерігається різкий стрибок у розвитку силової напівпровідникової елементної бази. Поява нових силових напівпровідникових приладів зумовлюється зростанням потреб і вимог економічнішого перетворення

електричної енергії. Результатом такого бурхливого розвитку електронної промисловості і технологій стала поява, з одного боку, принципово різних за своєю структурою, а з іншого – однакових за принципом функціонування силових напівпровідникових приладів:

- GTO (Gate turn-off thyristor) – повністю керований тиристор;
- IGBT (Isolated gate bipolar transistor) – біполярний транзистор з ізольованим затвором;
- IGCT (Integrated gate commutated thyristor) – повністю керований тиристор з інтегрованим затвором;
- ETO (Emitter turn-off thyristor) – вимикаючийся тиристор з емітерним управлінням.

Найбільш важливим етапом, особливо в проектуванні бортових високовольтних електротехнічних комплексів великої потужності, є вибір напівпровідникових ключових приладів, які власне і здійснюють перетворення електричної енергії. Від надійності і ефективності функціонування силових ключових елементів, як в номінальних режимах, так і в аварійних критичних ситуаціях залежать техніко-економічні показники і надійність роботи всього електротехнічного комплексу. Саме тому цьому етапу приділена особлива увага.

За результати комплексного аналізу вітчизняних, зарубіжних технічних матеріалів і наукових публікацій вибрано 4 групи критеріїв, що включають електричні параметри і якісні властивості силових напівпровідникових приладів. А саме:

- які відображають граничні експлуатаційні електричні умови функціонування приладів;
- які дозволяють оцінити можливі теплові втрати приладу;
- які вказують можливість збільшення гранично експлуатаційних електричних параметрів за допомогою простих схемотехнічних рішень;
- які розкривають необхідність побудови захисних кіл, що обмежують швидкість наростання напруги на закритому приладі.

До першої групи критеріїв віднесені такі електричні параметри:

максимальне значення постійної напруги (U_{dc}), при якій прилад може тривало функціонувати без виходу з ладу; максимальне значення струму (I_{av}), при якому прилад може тривало функціонувати без виходу з ладу.

Для більшості силових напівпровідникових приладів параметр U_{dc} в 0,67 раз нижче за максимально допустиму постійну напругу на закритому елементі. Проте в кожному конкретному випадку значення U_{dc} бажано уточнювати у виробника.

Параметр I_{TRMS} зазвичай наводиться в паспортних даних силових тиристорів. На відміну від тиристорів, значення I_{TRMS} для силових транзисторів IGBT необхідно визначати з формули:

$$I_{TRMS} = I_c / k_i, \quad (1.1)$$

де k_i – коефіцієнт перевищення максимального значення над діючим значенням струму, який протікає через транзистор у схемі, що розглядається для зазначеного випадку;

I_c – максимально допустимий тривалий струм, що протікає через транзистор.

Друга група критеріїв містить такі електричні параметри:

– значення падіння напруги (U_T) на відкритому приладі при протіканні через нього струму;

– тривалість часу (t_{don}) затримки на ввімкнення, значення якого дорівнює інтервалу часу між подачею імпульсу управління і початком процесу замикання напівпровідникового приладу;

– тривалість часу (t_{doff}) вимкнення, значення якого дорівнює інтервалу часу між початком процесу замикання приладу до моменту зменшення силового струму на 90 % від початкової величини;

– значення втрат (E_{on}) електричної енергії на ввімкнення, які виділяються в приладі під час переходу його із закритого у відкритий стан;

– значення втрат (E_{off}) електричної енергії на вимкнення, які виділяються

в приладі під час переходу його з відкритого в закритий стан.

Вказані параметри в сталому режимі роботи характеризують статичні втрати потужності в силовому напівпровідниковому приладі:

$$P_{cm} = \int_{t_1}^{t_2} u_{vs} \cdot I_{vs} dt \approx \int_{t_1}^{t_2} U_T \cdot I_{TRMS} dt, \quad (1.2)$$

і його динамічні втрати потужності на ввімкнення і вимкнення:

$$P_{on} = E_{on} \cdot f; \quad ma \quad P_{off} = E_{off} \cdot f, \quad (1.3)$$

де t_1 та t_2 – моменти часу початку і кінця протікання струму через прилад;
 u_{vs} – поточне значення падіння напруги на відкритому приладі при протіканні через нього струму на інтервалі часу від t_1 до t_2 ;

I_{vs} – поточне значення струму, що протікає через силовий прилад на інтервалі часу від на інтервалі часу від t_1 до t_2 ;

f – значення частоти перемикавання приладу.

Слід зауважити, що значення втрат E_{on} і E_{off} електричної енергії на ввімкнення і вимкнення наводяться для випадку, коли напруга на закритому приладі дорівнює U_{dc} , а струм, що протікає через відкритий прилад, дорівнює I_{TRMS} . Статичні втрати електричної енергії, які виділяються на сучасних силових напівпровідникових приладах у закритому стані, мають малі значення і ними можна нехтувати.

До третьої групи віднесені такі якісні властивості приладів:

- можливість безпроблемного функціонування при послідовному з'єднанні декількох напівпровідникових елементів;
- можливість безпроблемного функціонування при паралельному з'єднанні декількох напівпровідникових елементів.

Зазначені чинники дозволяють без ускладнення електричної схеми використовувати силові напівпровідникові прилади в перетворювальних пристроях із меншими, ніж номінальні, значеннями U_{dc} і I_{TRMS} .

Четверта група характеризує можливість функціонування силового напівпровідникового приладу без снаберних елементів. Цей чинник дозволяє спростити схему перетворювального пристрою і помітно знизити сумарні втрати потужності, особливо при перетворенні електричної енергії на підвищеній частоті (понад 400 Гц).

За допомогою запропонованих критеріїв проаналізовані сучасні силові напівпровідникові прилади відомих фірм: Semikron (Німеччина), Hitachi (Японія), ABB Semiconductors AG (Швейцарія), International Rectifier (США) та ін. У результаті проведеного аналізу кожного типу (GTO, IGCT, ETO і IGBT) вибрані силові прилади (табл. 1.3), які найбільш відповідають вирішенню завдань бортового високовольтного електротехнічного комплексу, що розробляється. Водночас через те, що обрані силові прилади мають різні максимальні значення постійної напруги і максимальні значення діючого струму, параметри падіння напруги (U_T) на відкритому приладі, втрати електричної енергії на ввімкнення (E_{on}) і вимкнення (E_{off}) наведені в табл. 1.3 при однакових значеннях U_{dc} і I_{TRMS} . З урахуванням можливих режимів роботи електротехнічного комплексу, що розробляється, прийняті такі значення: $U_{dc}=4500\text{В}$, а $I_{TRMS}=600\text{А}$.

Кращі значення наведених у табл. 1.3 параметрів виділено сірим кольором. Як видно з наведених даних для використання у високовольтному електротехнічному комплексі, силовий тиристор IGCT має велику кількість кращих значень вибраних параметрів. Зокрема, високовольтний тиристор IGCT має мале падіння напруги на відкритому приладі і, отже, менші порівняно з останніми силовими напівпровідниковими приладами статичні втрати потужності. Водночас високовольтний тиристор IGCT має малі значення тривалості часу затримки на вимкнення, тривалість часу вимкнення і втрати електричної енергії на вимкнення. Усі ці параметри безпосередньо впливають на динамічні втрати потужності в напівпровідниковому ключовому елементі, які виникають при переході із закритого стану у відкритий стан, і навпаки. Що менше значення вказаних параметрів, то менше динамічні втрати потужності. Відповідно вище допустима частота перемикання приладу, при якій можна

здійснювати перетворення електричної енергії, і менше маса і габарити електромагнітних і ємкісних елементів пристрою. Водночас зниження статичних і динамічних втрат потужності, що виникають у напівпровідникових приладах, істотно спрощує і здешевлює систему охолодження електротехнічного комплексу.

Таблиця 1.3 – Порівняльна таблиця параметрів силових напівпровідникових приладів

Тип НПП	Модель	U_T, B	E_{on}, mJ	E_{off}, mJ
IGBT	5SNA 0650J450300	2.9-3.7	1500-2100	2100-2900
IGBT	5SNA 0600G650100	4.2-5.4	3800-4900	1950-3150
IGCT	5SHY 55L4500	2.15-2.35	1800	26500-31500
IGCT	5SHZ 11H6500	2.92-5.87	3400	55500
GTO	5SGA 40L4501	4.4	3300	14000
GTO	5SGF 40L4502	3.8	3000	10000

Таким чином, параметри, за якими високовольтний тиристор IGCT має переваги, порівняно з іншими силовими приладами, фактично зумовлюють статичні й динамічні втрати пристрою і є найбільш важливими, оскільки практично однозначно визначають:

- тип і технічні вимоги до системи охолодження;
- частоту перетворення електричної енергії;
- масу і габарити перетворювального пристрою.

Також важливим параметром високовольтного напівпровідникового приладу є параметр, що характеризує «Можливість послідовного з'єднання приладів». Оскільки максимальне значення вхідної напруги живлення проєктованого бортового електротехнічного комплексу становить 4000 В при можливих пікових значеннях імпульсної напруги до 7000 В, то для цього випадку застосування ще не розроблені високовольтні високочастотні напівпровідникові прилади, що серійно випускаються. У зв'язку з цим велике значення отримує

чинник можливості надійної роботи при послідовному з'єднанні силових високовольтних приладів.

Останні параметри, за якими здійснено порівняльний аналіз, мають показовий характер. Наприклад, силові високовольтні ключові прилади мають градації потужності кола управління «Низька», «Середня» і «Висока», відповідні усередненим значенням 15 Вт, 30 Вт і 60 Вт. У той же час при струмі в 1000 А падіння напруги на відкритому приладі хоч би в $1,5 \div 2\text{В}$, призводить до різниці втрат потужності, що виділяються, 1500–2000 Вт, що в десятки разів більше, ніж потужність, яка витрачається на управління приладом.

Для практичного вибору приладів необхідно враховувати більш широкий набір коефіцієнтів, які відображають не номінальні (класифікаційні) параметри, а враховують реальні режими роботи напівпровідникових приладів у конкретних конструкціях перетворювачів.

1.4 Вибір методів дослідження електромагнітних процесів

Сучасне електроустаткування електропоїздів постійного струму являє собою складний комплекс електромагнітних, електромеханічних, електропневматичних, напівпровідникових та інших пристроїв, зв'язаних єдиним керуванням і загальним живленням від контактної мережі постійного струму високої напруги. При розробці розглянутого електротехнічного комплексу повинні вирішуватися завдання не тільки правильної й ефективної взаємодії різних систем поїзда, аналізу взаємовпливу негативних факторів при роботі різних пристроїв відповідно до режимів їхньої роботи, характеристиками й параметрами, а й питання зниження витрат на проектування, дослідження й випробування. Крім того, наголошуємо на необхідності вирішення завдання уніфікації, як пристроїв і елементів електроустаткування, так і аналізу робочих процесів, що дозволить спростити поточне обслуговування й ремонт усього електроустаткування. Очевидно, з погляду універсальності й економічності для

виконання поставлених завдань у настільки складних динамічних системах доцільно використати повнофункціональні засоби візуального комп'ютерного моделювання [29, 30].

Нині існує ряд пакетів комп'ютерного моделювання, де користувачеві надається можливість візуально описувати систему або у вигляді блок-схеми, або у вигляді карти станів. Крім цього, є розширені графічні й анімаційні можливості перегляду поточних або підсумкових результатів. Це дозволяє приділити більш детальну увагу аналізу робочих процесів, що відбуваються в системі, і не піклуватися про внутрішню програмну реалізацію.

Існуючі пакети візуального комп'ютерного моделювання, залежно від використовуваної мови, поділяються на три групи: пакети блокового (структурного) моделювання, пакети імітаційного моделювання й пакети, орієнтовані на використання гібридного автомата.

Найбільш відомими представниками першої групи є комп'ютерні пакети TUTSIM (1976, TutSim Inter.), EASY5 (1976, The Boeing Company), VisSim (1990, Visual Solutions, Incorporated) і MATLAB-SIMULINK (1991, The Mathworks Incorporated). Зауважимо, що перші два пакети комп'ютерного моделювання працюють тільки в режимі DOS і на сьогодні практично не застосовуються, незважаючи на ряд переваг, пов'язаних із низькими вимогами до типу комп'ютера й обсягу пам'яті. В основу комп'ютерних пакетів першої групи закладена графічна мова ієрархічних блок-схем. Кожний блок більше високого рівня ієрархії складається з набору стандартних або спеціалізованих блоків, з'єднаних між собою функціональними односпрямованими зв'язками. До переваг такого підходу належить простота створення моделі й легкість зміни як самої структури моделі, так і її параметрів.

До другої групи належать комп'ютерні пакети DesignLab (1997, MicroSim Corporation), Caspos (2001, Controllab Products B. V.), Dymola (1993, Dynasim A. B.), MathCad (1986, MathSoft), які використовують об'єктно-орієнтовані мови моделювання фізичних систем. Безперервні частини в них описуються за допомогою алгебраїчних і диференціальних рівнянь, а дискретні компоненти – за

допомогою дискретних подій, при виникненні яких змінним можуть привласнюватися нові значення. Такий підхід є природним при описі типових блоків фізичних систем. До недоліків варто віднести необхідність чисельного рішення великої кількості алгебраїчних рівнянь.

Представником третьої групи є пакет Model Vision Studium. У ньому використовується карта станів при описі перемикачів між станами, а також опис безперервних систем у вигляді системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь.

При дослідженні робочих процесів в електротехнічних комплексах з напівпровідниковими перетворювачами широко застосовуються комп'ютерні пакети другої групи й, зокрема, пакет прикладних програм Design Center 6.2 (подальша модифікація DesignLab 8.0, OrCAD 9.0). Його інтегроване структурне середовище дозволяє не тільки проводити аналіз динамічного поведіння різних електронних напівпровідникових пристроїв, досліджувати питання стійкості, здійснювати вибір конкретних фізичних параметрів аналогових, цифрових, цифро-аналогових компонентів тощо, а й впроваджувати принцип наскрізного автоматизованого проектування, зокрема й підготовку стандартизованої електротехнічної документації.

У прикладний пакет версії Design Center входять програми Schematics, PSpice & Basics, PSpice AD & Basics+ і Probe. Програма Schematics є графічним редактором, що служить для графічного уведення принципів електричних схем, для створення бібліотечних символів різних елементів і пристроїв, а також для передачі функцій керування іншим програмам (PSpice & Basics, PSpice A_D & Basics+, Probe тощо). Програма PSpice & Basics дозволяє здійснювати математичне моделювання електричних схем, що містять аналогові елементи. Програма PSpice AD & Basics+ служить для математичного моделювання аналого-цифрових пристроїв. Програма Probe дозволяє здійснювати файлову обробку, документування й відображення результатів математичного моделювання у вигляді двомірних графіків.

Перевагою розглянутого прикладного пакета програм Design Center є наявність великої бібліотеки математичних моделей реальних приладів (діодів,

транзисторів, тиристорів, операційних підсилювачів, цифрових інтегральних схем, магнітних сердечників тощо).

При наявних перевагах Design Center у галузі комп'ютерного моделювання електронних пристроїв, зазначений програмний продукт не можна безпосередньо використати при дослідженні робочих процесів разом з електромеханічними пристроями. Для вирішення цієї проблеми застосовують принцип електромеханічних аналогій, який передбачає заміну механічних змінних і постійних на аналогічні за фізикою явищ електричними змінними й постійними. Зокрема, електромагнітний момент електромеханічного пристрою й момент докладеного до ротора навантаження заміщають джерелом напруги, момент інерції ротора й момент інерції докладеного до ротора навантаження заміщають однообмотковим реактором, а швидкість ротора – змінною струму, що протікає по синтезованій електричній схемі заміщення. Всім перерахованим аналогам складеної електричної схеми присвоюють абсолютні чисельні значення, відповідні механічні постійні й змінні електромеханічного пристрою, представлені у системі вимірів СІ.

Застосування такого підходу демонструє, що пакет прикладних програм Design Center універсально адаптується до моделювання електротехнічних комплексів, функціонально об'єднуючи статичні перетворювачі, електромеханічні пристрої й цифро-аналогові системи керування. Однак досвід роботи з Design Center виявив проблеми збіжності і, як наслідок, високі витрати машинного часу при комп'ютерному моделюванні електротехнічних комплексів, що мають у своєму складі пристрої з істотно різними постійними часу. Особливо це виявляється за наявності високих швидкостей наростання струму або напруги на елементах електричного ланцюга, а також при використанні замкнутих систем керування.

Натомість використання у вказаних ситуаціях пакету Matlab дозволяє досягати збіжності процесів у комплексі з достатньо високою точністю розрахунків. До зручності Matlab можливо також віднести такі якості, як перевірена розробником достовірність вбудованих видів функціональних

електротехнічних блоків (випрямлячі, інвертори, силові ключі, електричні двигуни різних типів тощо), а також значне спрощення при створенні імітаційних моделей для різноманітних електротехнічних комплексів, адже формування математичного опису досліджуваного об'єкта виконується автоматично з урахуванням загальної сукупності та з'єднання між собою всіх функціональних блоків, що входять до складу досліджуваного складного електротехнічного об'єкта.

У разі відсутності того чи іншого стандартного функціонального блока можливе його створення за допомогою редактора Matlab Simulink, використовуючи блоки Power System Blockset й Power Electronics Toolbox, у вигляді ієрархічної блок-діаграми. Враховуючи наявність можливості об'єднання частини системи в підсистеми й розташування їх у блоках-контейнерах Subsystem, при проєктуванні моделі дуже часто вдається уникнути перевантаження схеми моделі візуальними зв'язками.

Крім того, Matlab забезпечує широкий вибір методів чисельного інтегрування, що дозволяє аналізувати перехідні процеси з високою точністю. Завдяки можливості взаємодії з мовами програмування, як-от Python та C++, розширюються можливості створення складних обчислювальних моделей. Це робить Matlab незамінним інструментом для дослідження енергоефективності та динамічних характеристик електротехнічних систем.

Використання пакету Matlab надає можливість заздалегідь визначити необхідну точність розрахунків електромагнітних і електромеханічних процесів. Як обчислювальний метод здебільшого застосовується широко відомий метод Рунге-Кутта для чисельного вирішення нелінійних диференціальних рівнянь. У [31] наведені методи автоматичного проєктування електронних схем, розроблені українськими дослідниками.

Для дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів у пристроях силової електроніки та перетворювальної техніки використовують такі наукові методи:

- 1) операторний метод – дозволяє отримати точні аналітичні рішення

систем диференціальних рівнянь, що описують досліджуваний об'єкт керування, у явному вигляді алгебри;

2) метод еквівалентних джерел – застосовується для спрощення розрахунків складних електромагнітних і електромашинних кіл;

3) кусково-поліноміальний метод – призначений для розрахунку електромагнітних процесів в електричних схемах, що змінюють топологію під час функціонування;

4) метод підпорядкованого регулювання – дозволяє формувати нормовану якість електромагнітних і електромеханічних процесів в електротехнічному комплексі;

5) метод релейного керування – забезпечує в заданих межах регулювання робочих величин комплексу;

6) метод цифрового (комп'ютерного) імітаційного моделювання – дає змогу здійснювати кількісну та якісну оцінку стаціонарних і динамічних електромагнітних і електромеханічних процесів в електротехнічному комплексі. Зокрема, він дозволяє аналізувати параметри, які складно виміряти безпосередньо (наприклад, магнітний потік, електромагнітний момент двигуна постійного струму тощо). Крім того, цей метод значно знижує собівартість досліджень, особливо для складних і дорогих автоматизованих електротехнічних комплексів із напівпровідниковими перетворювачами [32];

7) метод експериментального дослідження – використовується для оцінки похибок розробленої імітаційної моделі та перевірки достовірності отриманих результатів;

8) метод фізичного моделювання – передбачає створення лабораторної моделі в зменшеному масштабі та проведення експериментів на ній. Отримані висновки та дані поширюються на реальні досліджувані об'єкти. Зазвичай цей метод застосовується у випадках, коли проведення експериментів у реальному масштабі є неможливим або занадто витратним.

1.5 Постановка завдання дослідження

У результаті аналізу стану розробки, виробництва та експлуатації електропоїздів в Україні з урахуванням тенденцій розвитку електрорухомого складу сформулюємо завдання дослідження.

1. Розробити та дослідити енергоефективну схему імпульсного регулювання двигуном постійного струму, яка забезпечує функціонування електропоїзда постійного струму з двигуном послідовного збудження в режимах пуску, регулювання, формування характеристик, динамічного рекуперативного гальмування аналогічним двигунам з незалежним збудженням.

2. Розробити та дослідити електромагнітні процеси в системі захисту від буксування.

3. Розробити комп'ютерні моделі та провести необхідні дослідження режимів комплексу електротехнічного тягового обладнання.

4. Розробити рекомендації та дослідити алгоритми роботи схем перетворювачів для живлення власних потреб електропоїздів постійного струму на базі інверторно-трансформаторної схеми перетворювача.

5. Розробити рекомендації до створення електропоїздів постійного струму з живленням від контактної мережі 3–6 кВ.

6. Провести експериментальні дослідження запропонованих технічних рішень.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Аналіз сучасного стану залізничного транспорту в Україні показав, що на залізницях експлуатуються електропоїзди, у конструкції яких застосовано технічні рішення першої половини ХХ століття. Ступінь зносу цього рухомого складу досягає 90%, що призводить до значних втрат електроенергії та зростання експлуатаційних витрат.

2. Сучасний розвиток електропоїздів визначається широким впровадженням силової електроніки у складі комплексів тягового обладнання та систем живлення власних потреб, що суттєво підвищує їх експлуатаційні та енергетичні характеристики.

3. Закордонні компанії активно застосовують у тягових електроприводах електропоїздів змінного та постійного струму асинхронні тягові двигуни, що сприяє зменшенню навантаження на вісь та зниженню експлуатаційних витрат. В Україні ця технологія лише починає впроваджуватися в нових розробках електропоїздів.

4. Розвиток швидкісного руху та підвищення потужності електропоїздів обмежується пропускною спроможністю контактної мережі, що вимагає її модернізації. Новітні дослідження показують, що при напрузі контактної мережі 18–35 кВ витрати на її будівництво на 20–30% нижчі, ніж для мережі 25 кВ, водночас пропускна спроможність збільшується пропорційно відношенню допустимих навантажень струмопроводів у системах постійного та змінного струму.

5. Враховуючи стан економіки та наявну матеріально-технічну базу України, на поточному етапі доцільним є впровадження імпульсного регулювання тягових двигунів постійного струму під час капітальних ремонтів електропоїздів.

6. Для живлення власних потреб електропоїздів постійного струму в Україні доцільно використовувати інверторно-трансформаторні перетворювачі, що стане основою для подальшої реалізації аналогічних перетворювачів із живленням від високовольтних тягових мереж (15–25 кВ) для електропоїздів постійного та змінного струму.

7. На основі проведеного аналізу в підрозділі 1.5 сформульовано постановку завдань дослідження.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СХЕМИ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЇХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

У розділі 1 було показано недоліки схем регулювання частоти обертання тягових електродвигунів (ТЕД) послідовного збудження. У [33] наведено, що динаміка пуску та гальмування ТЕД з незалежним збудженням має кращі характеристики. Тому виникає необхідність розробки схеми тягової електропередачі, яка об'єднує кращі властивості ТЕД послідовного та незалежного збудження.

Досягти таких властивостей можливо шляхом використання силових схем зі змінними структурою та алгоритмами керування [24].

Нижче представлено розробку нової модернізованої схеми тягової електропередачі, яка відповідає вищезазначеним вимогам, а також математичні моделі реалізації тягових характеристик у режимах пуску, гальмування та сталого руху [34, 35, 36, 37].

2.1 Принцип дії модернізованої схеми імпульсного керування

На рис. 2.1 (а, б) представлені класична та модернізована схеми імпульсного регулювання тягового електроприводу з ТЕД послідовного збудження.

На відміну від класичної схеми, у модернізовану схему введено два допоміжних діоди D3 та D4, а резистор R1 підключено до катода D4 і обмотки збудження.

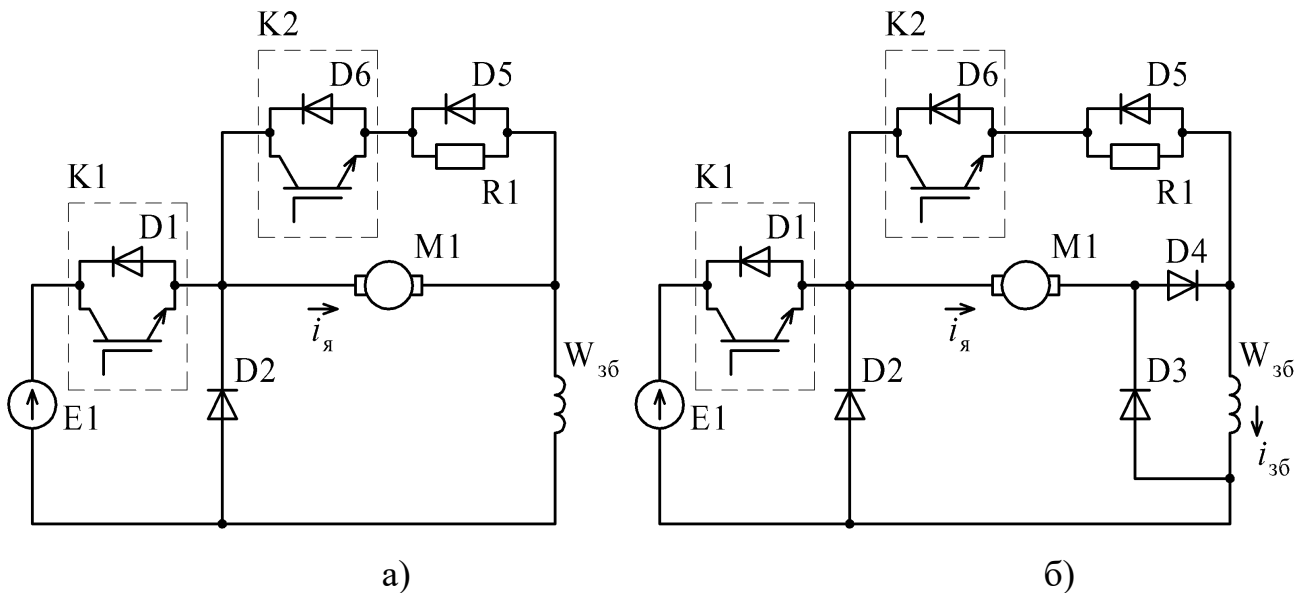


Рисунок 2.1 – Схеми імпульсного регулювання частоти обертання електроприводу з ДПЗ: а) класична схема імпульсного регулювання; б) модернізована схема імпульсного регулювання

Основна особливість принципу дії модернізованої схеми полягає в такому. При модуляції струму ключем К1:

1) наявність діодів D3-D4 дозволяє суттєво знизити пульсацію струму збудження порівняно з пульсаціями струму якоря, що призводить до збільшення його середнього значення за рахунок зростання середнього струму збудження. Це явище ілюструється діаграмами зміни струму та напруги в колах якоря та збудження двигуна (рис. 2.2).

На рис. 2.2 прийнято такі позначення: T_m – період модуляції; γ_1 – щільність імпульсів, $\gamma_1 = T_1/T_m$.

Це явище пояснюється значною різницею постійних часу обмоток якоря $T_я$ та збудження $T_{зб}$.

$$T_я = L_я/R_я \text{ та } T_{зб} = L_{зб}/R_{зб}, \quad (2.1)$$

де $L_я$, $L_{зб}$, $R_я$, $R_{зб}$ – індуктивності та активні опори обмоток якоря і збудження відповідно.

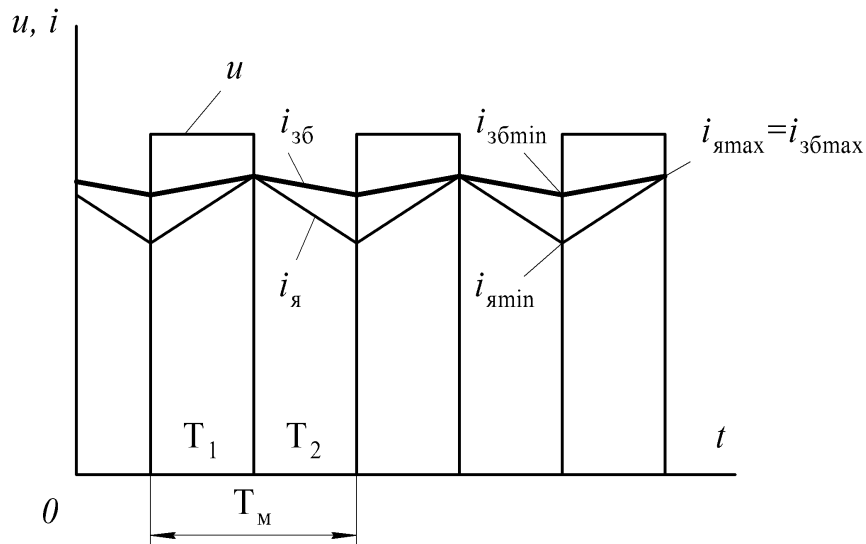


Рисунок 2.2 – Діаграма напруг та струмів у колі якоря

Наприклад, для тягових двигунів типу 1ДТ-003.5У постійна часу кола якоря становить $T_{\text{я}} = 0,04$ с., а обмотки збудження – $T_{\text{зб}} \approx 0,3 \div 0,4$ с. Відношення постійних часу становить $T_{\text{зб}}/T_{\text{я}} \approx 8 \div 10$.

Аналіз рис. 2.2 та схеми рис. 2.1.б показує, що при ввімкненні ключа К1 струм якоря $i_{\text{я}}$ наростає до максимальної величини. Водночас цієї ж величини досягає і струм збудження. Після вимкнення ключа К1 струм якоря та струм збудження починають спадати, але з різними постійними часу. За частоти модуляції ключа $f_{\text{м}} = 300 \div 1000$ Гц період модуляції становить $T_{\text{м}} = 3,3 \div 1$ мс. Оскільки $T_{\text{зб}} \gg T_{\text{м}}$, середнє значення струму збудження можна вважати практично постійним, що дозволяє прийняти:

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{зб}} &= I_{\text{яmax}}, \\ i_{\text{ДЗ}} = i_{\text{зб}} - i_{\text{я}} &= I_{\text{яmax}} - I_{\text{ямин}} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Наявність ключа К2 та опору R1 дозволяє регулювати струм обмотки збудження. При синхронному ввімкненні К2 з ключем К1 струм збудження зростає на величину, середнє значення якої визначається як:

$$\Delta i_{\text{зб}} = U \cdot \gamma_2 / R1, \quad (2.3)$$

де γ_2 – щільність ключа К2;

U – напруга живлення контактної мережі.

При ввімкненні К2 діод D4 зачинається, а струм якоря $i_{я}$ протікає через діод D3. Водночас струм діода зменшується на величину $i_{я}$ відповідно до співвідношення з урахуванням (2.2) та (2.3)

$$i_{D3} = i_{зб} + \Delta i_{зб} - i_{я} \approx i_{яmax} + \Delta i_{зб} - i_{я}. \quad (2.4)$$

При досягненні необхідної величини струму збудження ключ К2 вимикається, і струм збудження сягає величини

$$i_{зб} = i_{яmax} + \Delta i_{зб}. \quad (2.5)$$

Зростання $i_{зб}$ призводить до зростання потоку збудження та відповідно до моменту ТЕД, що спричиняє зменшення частоти обертання.

Очевидно, що цей режим можна використовувати у випадках наявності регулятора швидкості – у режимах сталого руху на нерівній колії або в режимах пуску та гальмування для підтримання максимального пускового або гальмівного моментів.

Таким чином, запропонований принцип роботи схеми дозволяє реалізувати режими роботи ТЕД послідовного збудження, еквівалентні режимам роботи ТЕД незалежного або змішаного збудження, без використання допоміжних джерел живлення. Це є принциповою відмінністю модернізованої схеми від класичної.

На рис. 2.3 наведено приклад реалізації схеми тягової електропередачі з використанням принципів дії модернізованої схеми на базі електропередачі моторного вагона електропоїзда ЭР-22.

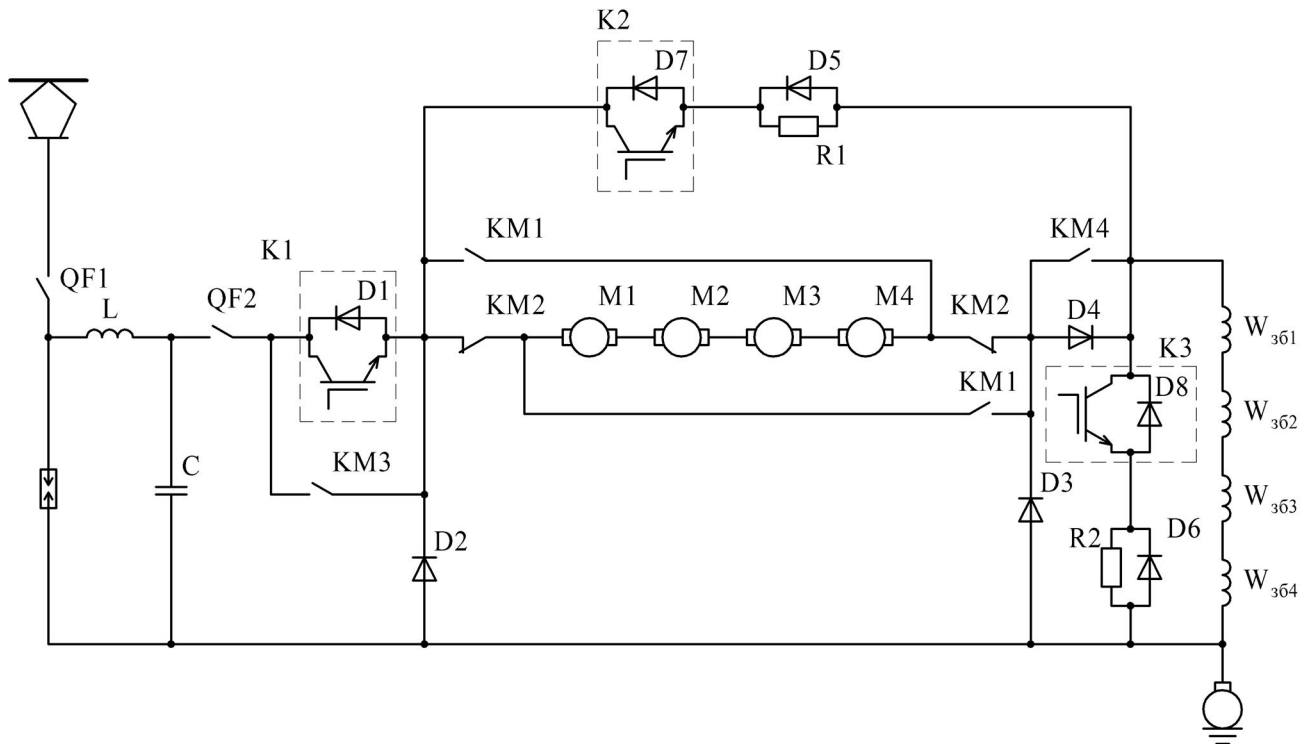


Рисунок 2.3 – Принципова схема модернізованого моторного вагона електропоїзда з ТЕД типу 1ДТ-003

Схема (рис. 2.3) забезпечує пуск, регулювання (включаючи двозонне), а також електродинамічне гальмування.

Як ключі K1, K2, K3 можливо використати IGBT-модулі або IGCT-тиристри з робочою напругою до 6,5 кВ і струмом 500-1000 А. Частота модуляції становить 500–1000 Гц. Двозонне регулювання забезпечується ключем K3. У сталому режимі при двозонному регулюванні ключі K1 і K2 залишаються у відкритому стані без модуляції, тому можливе шунтування ключа K1 контактами контактора KM3, а діода D4 – контактором KM4.

Перемикання контакторів KM3 та KM4 відбувається майже безструмово, що підвищує їх надійність. У такому режимі схема працює аналогічно класичній схемі, забезпечуючи максимальний ККД.

2.2 Схеми та математичні моделі режимів роботи модернізованої схеми

Як видно з аналізу принципу дії модернізованої схеми імпульсного регулювання швидкості ТЕД послідовного збудження, схема працює зі змінною структурою. Струми діодів D3 та D4 змінюються протягом інтервалу провідності ключа K1 або K2. Моменти зміни струмів залежать від співвідношення напруги живлення та проти ЕРС двигунів та постійних часу кіл, які мають змінну структуру. Аналіз аналітичними методами стає громіздким й трудомістким і тривалим, тому виникає потреба в розробці математичної моделі і комп'ютерному дослідженні електромагнітних та електромеханічних процесів. Для цього наведемо математичні моделі окремих елементів і алгоритмів їх роботи.

Рівняння компонентів математичних моделей ідеальних пасивних компонентів схеми [38]:

– для ідеального резистора

$$u(t) = R \cdot i(t) = i(t)/G, \quad (2.6)$$

де R та G – опір та провідність резистора відповідно;

– для ідеального конденсатора

$$i(t) = C \cdot du(t)/dt, \quad (2.7)$$

де C – ємність конденсатора;

– для ідеальної котушки індуктивності

$$u(t) = L \cdot di(t)/dt, \quad (2.8)$$

де L – індуктивність котушки.

Для активних елементів схеми введено наступні припущення.

Силлові ключі перетворювача – безінерційні, тому комутація відбувається практично миттєво. Структурна схема такого ключа показана на рис. 2.4. R_{ON} – активний опір ключа у відкритому стані.

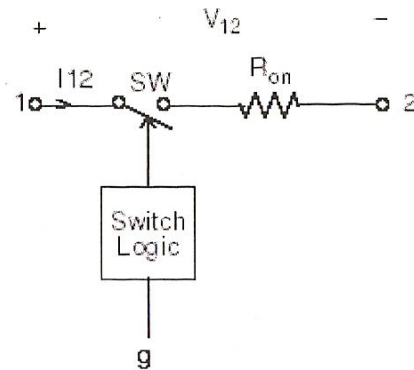


Рисунок 2.4 – Структурна схема напівпровідникового ключа

Статичні вольт-амперні характеристики моделі ключа показані для відкритого та закритого станів на рис 2.5.



Рисунок 2.5 – Статичні вольт-амперні характеристики моделі ключа

Для двигуна ТЕД постійного струму з послідовним збудженням пропонується використання в загальному випадку схеми заміщення, наведеної на рис. 2.6 [38]. Вплив вихрових струмів в обмотці збудження не враховується оскільки струм збудження, як показано у розділі 2.1 приймаємо постійним.

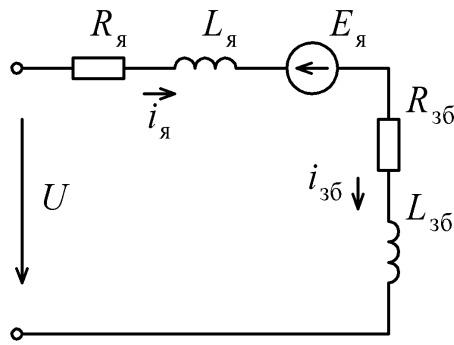


Рисунок 2.6 – Схема заміщення ТЕД постійного струму з послідовним збудженням

На рис. 2.6 позначено: $R_{зб}$, $L_{зб}$ – активний опір та індуктивність обмотки послідовного збудження, $R_{я}$, $L_{я}$ – активний опір та індуктивність обмотки якоря; $i_{зб}$, $i_{я}$ – струми відповідно обмотки послідовного збудження та кола якоря; U , $E_{я}$ – напруга живлення та електрорушійна сила двигуна. При проведенні досліджень необхідно зазначити, що у випадку роботи схеми в різних режимах співвідношення постійних часу, струмів $i_{зб}$, $i_{я}$ змінюватиметься.

З теорії електричних машин відомо, що динаміка системи з двигуном послідовного збудження описується двома рівняннями:

– електричної рівноваги:

$$U = E + L_{\Sigma я} \cdot di_{я}(t)/dt + i_{я}(t) \cdot R_{\Sigma я}, \quad (2.9)$$

де $L_{\Sigma я} = L_{я} + L_{зб}$; $R_{\Sigma я} = R_{я} + R_{зб}$;

– механічного руху:

$$M_{ст} = M_{д} + J \cdot d\omega/dt, \quad (2.10)$$

У (2.9) та (2.10) U – напруга живлення контактної мережі; $E = C_e \cdot \omega \cdot \Phi_{зб}$ – електрорушійна сила якоря; $M_{д} = C_m \cdot i_{я} \cdot \Phi_{зб}$ і $M_{ст}$ – моменти двигуна та статичний відповідно.

При пуску з постійним струмом ($i_{я} = const$) й, відповідно, з постійним

струмом збудження ($\Phi_{3\delta} = const$) електромеханічна характеристика має вигляд:

$$\omega = \frac{U}{C_E \cdot \Phi_{3\delta}} - \frac{R_{\Sigma я}}{C_E \cdot \Phi_{3\delta}} i_{я}. \quad (2.11)$$

При закінченні пуску коли:

$$U - E \leq L_{\Sigma я} \cdot \frac{di_{яп}}{dt} + i_{яп} \cdot R_{\Sigma я}, \quad (2.12)$$

механічна характеристика приймає вигляд:

$$\omega = \frac{U}{C_E \cdot \Phi_{3\delta}(i_{я})} - \frac{R_{\Sigma я}}{C_E^2 \cdot \Phi_{3\delta}^2(i_{я})} M. \quad (2.13)$$

Таким чином при пуску з постійним струмом електромеханічна характеристика має дві ділянки. Перша відповідає пуску ТЕД з незалежним збудженням, друга – пуску ТЕД з послідовним збудженням.

Особливості формування струмів при імпульсному регулюванні струму ТЕД, як показано на рис. 2.2 струми якоря та збудження мають різний рівень пульсацій, що пояснюється різними постійними часу обмоток якоря та збудження. Наявність діодів D2, D3, D4 робить структуру якірного кола змінною.

На інтервалі T_1 роботи ключа K1 рівняння електричної рівноваги мають вигляд (2.9). На інтервалі T_2 ключа K1 рівняння рівноваги мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= E + L_{я} \cdot \frac{di_{я}(t)}{dt} + i_{я}(t) \cdot R_{я}, \\ 0 &= L_{3\delta} \cdot \frac{di_{3\delta}(t)}{dt} + i_{3\delta}(t) \cdot R_{3\delta}, \\ i_{D3} &= i_{3\delta}(t) - i_{я}(t), \\ i_{D4} &= i_{3\delta}. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Електромагнітний момент M_D має збільшену величину за рахунок потоку

збудження, який відрізняється на величину $\Delta\Phi_{зб}$, відповідно до збільшення струму збудження відносно до струму якоря на величину $\Delta I_{зб}$ (2.3).

При досягненні частоти обертання якоря ω (рівняння (2.12)) струм збудження і струм якоря стає менше пускового струму, а темп спадання електромагнітного моменту ТЕД суттєво меншим, що сповільнює швидкість розгону двигуна.

Розглянемо процес формування прискорення при пуску ДПЗ.

При виконанні умови (2.12) використовуючи ключ гальмування К2 (рис. 2.3) збільшуємо струм збудження до величини струму пуску. Для цього ключ К2 вмикають на час за який струм збудження досягне струму пуску і описується рівнянням:

$$U = L_{зб} \cdot \frac{d(i_{зб} - i_{я})}{dt} + (i_{зб} - i_{я}) \cdot (R_1 - R_{зб}) \quad (2.15)$$

Рівняння (2.15) діє при $i_{зб} \leq i_{збп}$.

Особливість схеми полягає в тому, що при увімкненні ключа К2 до анода діода D4 прикладається потенціал напруги мережі, що призводить до його відключення на період зростання струму збудження до величини пускового струму. У цьому режимі струм якоря через діод D4 переривається, а струм якоря протікає через діод D3, струм якого дорівнює струму збудження, що є більшим за струм якоря. Для усунення зниження струму якоря та обмеження перенапруг на діоді D4 при його вимкненні доцільно включити в схему ключ К4.

Алгоритм роботи ключів такий.

При увімкненому К1 вмикається К2, і одночасно з К2 вмикається К4. Струм якоря замикається у колі Е1 – ключ К1 – обмотка якоря – ключ К4. Ключ К4 працює в режимі бустера. При $i_{зб} = i_{збп}$ ключ К2 вимикається одночасно з ключем К4.

збудження енергія гальмування рекуперується у контактну мережу через діод ключа К1, а струм рекуперації визначається рівнянням

$$U - E = -L_{\Sigma Я} \cdot \frac{di_{Я}}{dt} + i_{Я} \cdot R_{\Sigma Я}. \quad (2.17)$$

Рекуперація можлива за умови:

$$-E \leq U_{max}. \quad (2.18)$$

де U_{max} – допустима напруга мережі.

При досягненні $E = U_{max}$ ключ К2 вмикається і струм гальмування визначається рівнянням (2.16).

Зазначимо, що режим гальмування є ефективним за умови наявності навантаження у мережі живлення. При відсутності навантаження у зовнішній мережі струм гальмування визначається потужністю приймачів енергії власних потреб, яка становить не більше 5-10% тягової потужності моторного вагона.

Для забезпечення ефективнішого гальмування необхідно підтримувати постійний струм якоря і збудження при зменшенні частоти обертання якоря. Для реалізації цього режиму необхідно сформувати контур, який продовжуватиме проводити струм гальмування при вимкненому ключі К2. При постійному струмі гальмування необхідно виконувати співвідношення:

$$I_1^2 \cdot R_1 = (I'_1)^2 \cdot R'_1 \quad \text{або} \quad \frac{I_{R1}}{I_{R'_1}} = \sqrt{\frac{R'_1}{R_1}}. \quad (2.19)$$

де R'_1 – опір кола якір-обмотка збудження.

Для формування такого контуру необхідно зашунтувати діод D2 ключем К5, як показано на рис. 2.8.

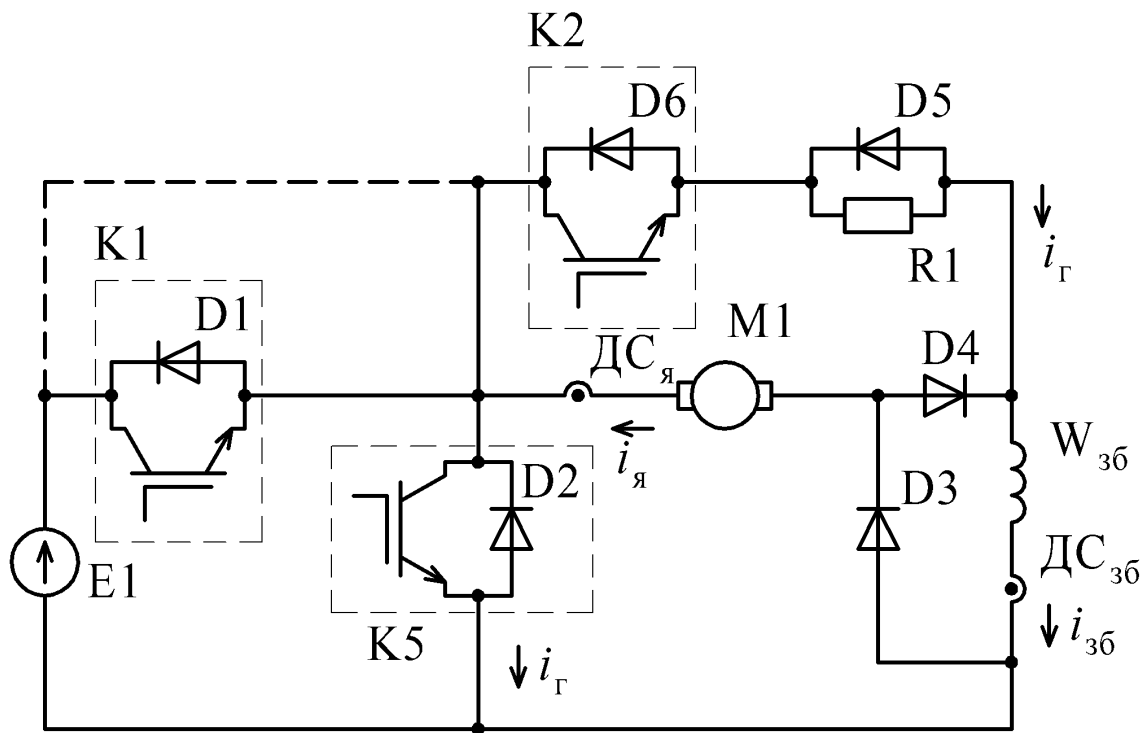


Рисунок 2.8 – Принципова схема гальмування з постійним струмом

При вимкненні ключа K2 струм гальмування має два контури й протікає в колі K5 – діод D3 – обмотка якоря – ключ K5 та в колі діод D3 – діод D4 – обмотка збудження – діод D3.

Струми визначаються рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= E - L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} - i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}, \\ 0 &= L_{\text{зб}} \cdot \frac{di_{\text{зб}}}{dt} + i_{\text{зб}} \cdot R_{\text{зб}}, \\ i_{D3} &= i_{\text{зб}} + i_{\text{я}}, \\ i_{D4} &= i_{\text{зб}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

Струм збудження і струм гальмування на різних ділянках роботи ключа K2 визначається сумарним опором відповідних кіл $R_{\text{я}}$ та $R_1 + R_{\text{зб}}$.

Для підтримки постійного моменту необхідно забезпечувати рівність струмів у відповідних колах, що досягається контролем відповідних струмів. Максимальний потік збудження визначається опором R_1 .

Для формування постійного струму збудження коло ключа K2 – R1

треба жити від тягової мережі, що показано на рис. 2.8 пунктиром, або $R'_1 < R_1 = E_1/I_{я.ном}$.

Регулювання частоти обертання вище основної в модернізованій схемі реалізується ключем КЗ, який зашунтовує обмотку збудження. У цьому режимі процес описується рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} U &= E + L_{я} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + i_{я} \cdot R_{\Sigma} - (i_{я} - i_{зб}) \cdot R_{я'} \\ L_{зб} \cdot \frac{di_{зб}}{dt} + i_{зб} \cdot R_{зб} &= (i_{я} - i_{зб}) \cdot R_{я'} \\ i_{D4} &= i_{я}. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

Водночас система керування повинна забезпечувати наростання та спадання струму збудження за умови підтримання постійного струму якоря та $E_{я} < E_1$.

У режимі рекуперації енергії схема має особливості роботи.

Режим рекуперації настає, коли ЕРС ДПЗ стає більшою за напругу мережі.

Режим рекуперації настає за таких умов:

- а) різке падіння напруги мережі;
- б) висока швидкість наростання струму збудження при двозонному регулюванні;
- в) рух електропоїзда з ухилу.

У режимі рекуперації струм якоря змінює знак. Тобто при зміні знака струму в наведених вище схемах діод D4 зачиняється під дією напруги $\Delta U = U_{\Gamma} - E$, а діод D3 зашунтовує обмотку збудження.

Режим рекуперації в разі падіння напруги призводить до гальмування електропоїзда і відповідно до зниження швидкості руху. Для уникнення небажаного режиму необхідно зменшити струм збудження ключем КЗ (рис. 2.3), який у такому разі не змінює знак таким чином, щоб підтримати постійний струм якоря в двигуновому режимі за рахунок зниження ЕРС двигуна. Зазначимо, що для визначення режиму рекуперації необхідно вимірювати величину і знак

струму якоря. При русі електропоїзда з ухилом режим рекуперації є бажаним, оскільки дозволяє економити електроенергію, підтримуючи задану швидкість.

Однак у цьому режимі є одна особливість. При зміні знака струму якоря діод D3 зашунтовує обмотку збудження, що призводить до спаду струму збудження і відповідно до спаду струму рекуперації.

Підтримати струм збудження можна за допомогою увімкнення ключа K2, який підтримуватиме необхідний струм збудження. Недоліком цього режиму є втрати електроенергії в резисторі R1.

Втрати енергії становлять:

$$\Delta P = I_{36}^2 \cdot R_1 = \frac{U^2 \cdot \gamma^2}{R_1}. \quad (2.22)$$

У роботах [35, 36, 39, 40, 41, 42] розглянуто низку алгоритмів, які можуть бути використані в перетворювачах DC-DC для ДПЗ у різних режимах роботи, переважно в міському транспорті, що сприяє покращенню енергетичних характеристик.

2.3 Рекомендації з реалізації модернізованої схеми тягової електропередачі електропоїздів постійного струму з ДПЗ

Аналіз режимів роботи, схем та алгоритмів функціонування модернізованої схеми з ДПЗ, проведений у цьому розділі, показав, що всі режими пуску, сталого руху, електродинамічного гальмування, гальмування з рекуперацією енергії до мережі реалізуються при незмінному за знаком струмі збудження та змінному за знаком струмі якоря.

Ці обставини дозволяють запропонувати модернізовану схему електропередачі моторного вагона електропоїзда з двигуном напругою 750 В.

У цій схемі, на відміну від схеми, наведеної на рис. 2.3, реверс руху

відбувається за рахунок реверсу струму збудження.

Запропонована схема, при реалізації розроблених алгоритмів у цьому розділі, дозволяє автоматично формувати необхідні структурні схеми силового кола при коливаннях напруги мережі та реалізації режимів руху електропоїзда.

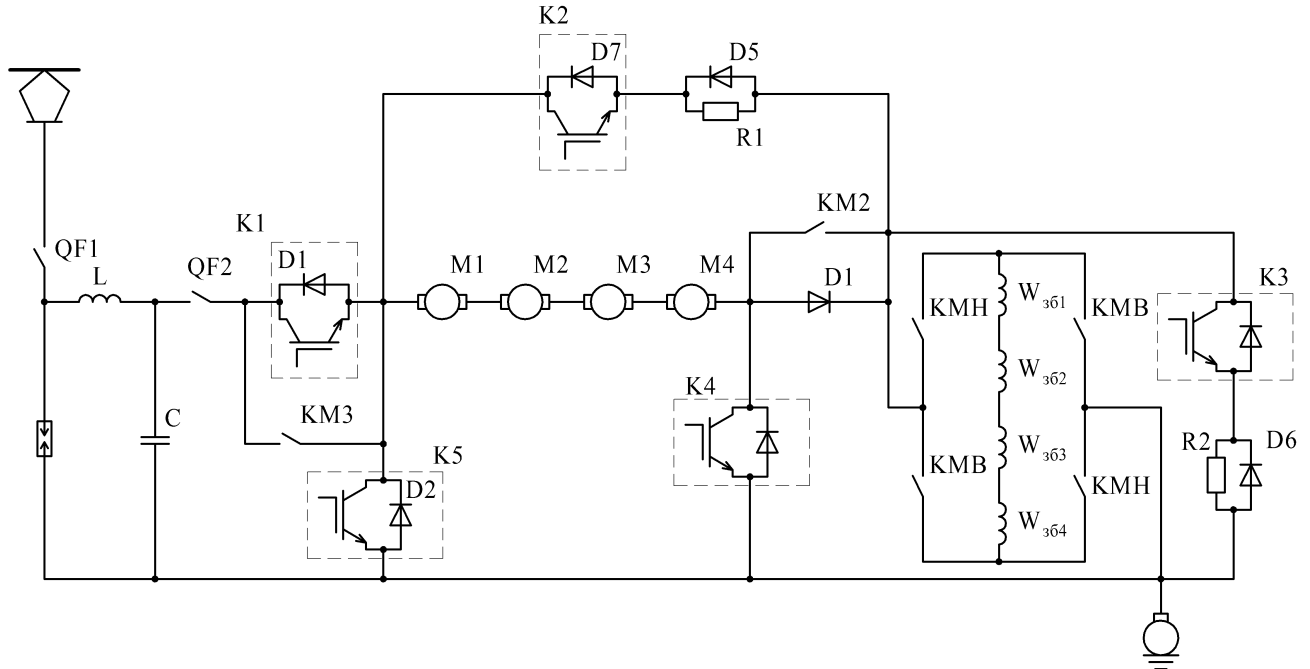


Рисунок 2.9 – Рекомендована схема модернізованої електропередачі з ДПЗ для моторного вагона

Короткочасні коливання напруги [23], пов'язані з роботою комутаційної апаратури, відривом пантографа [43], поглинаються вхідним фільтром LC. Для реалізації схеми потрібен модуль з напругою 6500 В.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Розроблено нову модернізовану схему, яка дозволяє формувати сталі та динамічні режими роботи ДПЗ, еквівалентні режимам двигунів постійного струму з незалежним (змішаним) збудженням без використання допоміжних джерел живлення обмотки збудження, що значно спрощує схему електропередачі та знижує її собівартість.

2. Розроблено математичні моделі та алгоритми роботи ключів

модернізованої силової схеми для різних режимів роботи.

3. Показано, що реалізація високоефективних режимів роботи досягається безконтактною зміною структури силових кіл на періоді модуляції струмів якоря або збудження.

4. Визначено, що в режимах пуску струм допоміжного діода D3 є рівним різниці струмів якоря та збудження, а в режимі гальмування дорівнює їхній сумі.

5. Розроблена модернізована схема впроваджена у ТОВ «НДІ Перетворювач» (м. Запоріжжя) при реалізації проєктів модернізації електровозів ЧМ1 та електроприводів з ДПЗ мостового крану вантажопідйомністю 60 т на Алчевському меткомбінаті.

РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СХЕМИ

Визначити найбільш ефективну і найменш складну схему керування ДПЗ можна, якщо проаналізувати процеси в модернізованій та класичній схемах імпульсного регулювання, а також порівняти динаміку ДПЗ за різних схем регулювання.

Дослідження динаміки тягової передачі виконано на базі двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПЗ) типу 1ДТ-003.5У

Дослідження динаміки електропередачі з ДПЗ проводиться з урахуванням рівнянь, режимів та алгоритмів, наведених у розділі 2.

При моделюванні були прийняті такі допущення:

- магнітна система двигуна вважається ненасиченою;
- не враховується вплив реакції якоря;
- розподіл моменту двигунів вважається рівномірним.

Технічні характеристики тягового двигуна 1ДТ-003.5У [44]:

- номінальна напруга $U = 750$ В;
- потужність $P = 235$ кВт;
- сила струму $I = 345$ А;
- номінальна частота обертання $n = 1250$ хв⁻¹;
- максимальна частота обертання $n_{\max} = 2240$ хв⁻¹;
- маса $m = 2300$ кг;
- момент інерції двигуна та обертової частини моторного візка $J = 315$ Нм.

Параметри імітаційної моделі цього двигуна визначено за методикою, наведеною в [45, 46].

Усі подальші розрахунки та графіки залежностей наведено у відносних одиницях. За базові значення прийнято такі:

- електромагнітний момент $M = 5$ кН·м;
- кутова частота обертання $\omega = 130$ рад/с;
- струм $I = 345$ А.

Оскільки момент інерції практично не впливає на перебіг електромеханічних процесів, для зменшення часу моделювання, приймаємо $J = 315$ Нм, що відповідає моменту інерції двигуна та обертових частин моторного візка.

3.1 Порівняльний аналіз схем регулювання тягових ДПЗ

У цьому розділі проведено порівняльний аналіз роботи ДПЗ у режимах пуску та реостатного гальмування для схем реостатно-контакторної, класичної імпульсної рис. 3.1,а та модернізованої рис. 3.1,б з урахуванням прийнятих раніше допущень.

Для схеми реостатно-контакторного регулювання маємо чотири ступені.

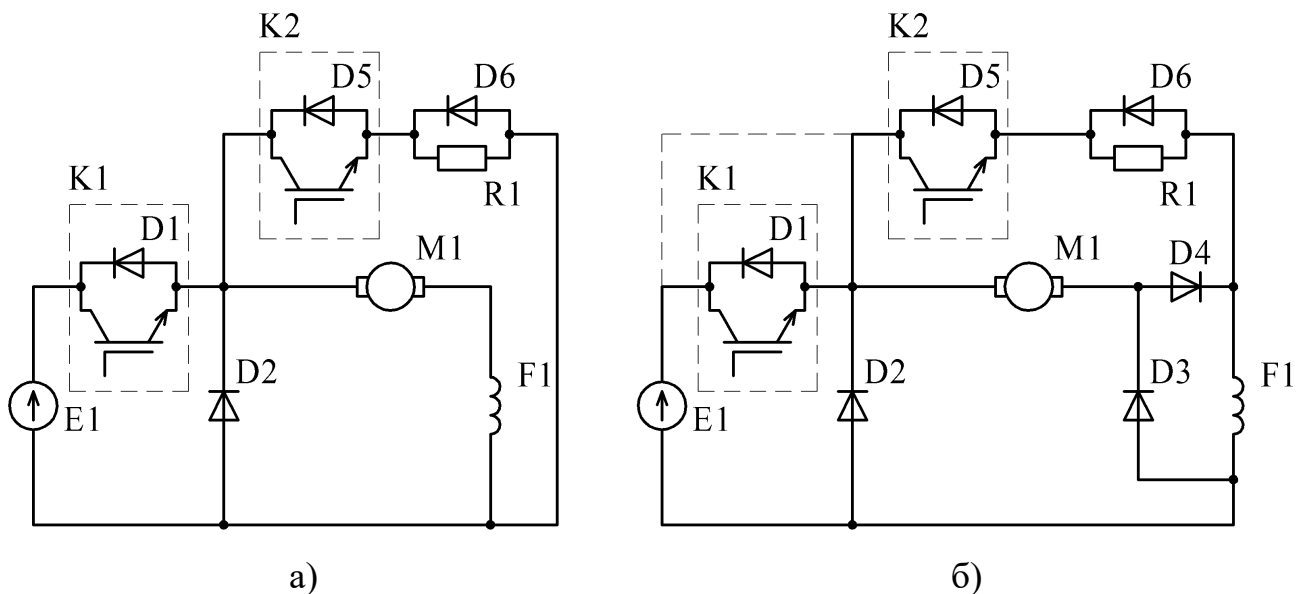


Рисунок 3.1 – Схеми імпульсного регулювання швидкості ДПЗ:

а) класична; б) модернізована

Для проведення досліджень тягового електроприводу з ДПЗ було розроблено імітаційну модель, побудова та використання якої здійснюється в середовищі Simulink пакета Matlab. Принципова схема та загальний вигляд моделі наведені на рис. 3.2. [47].

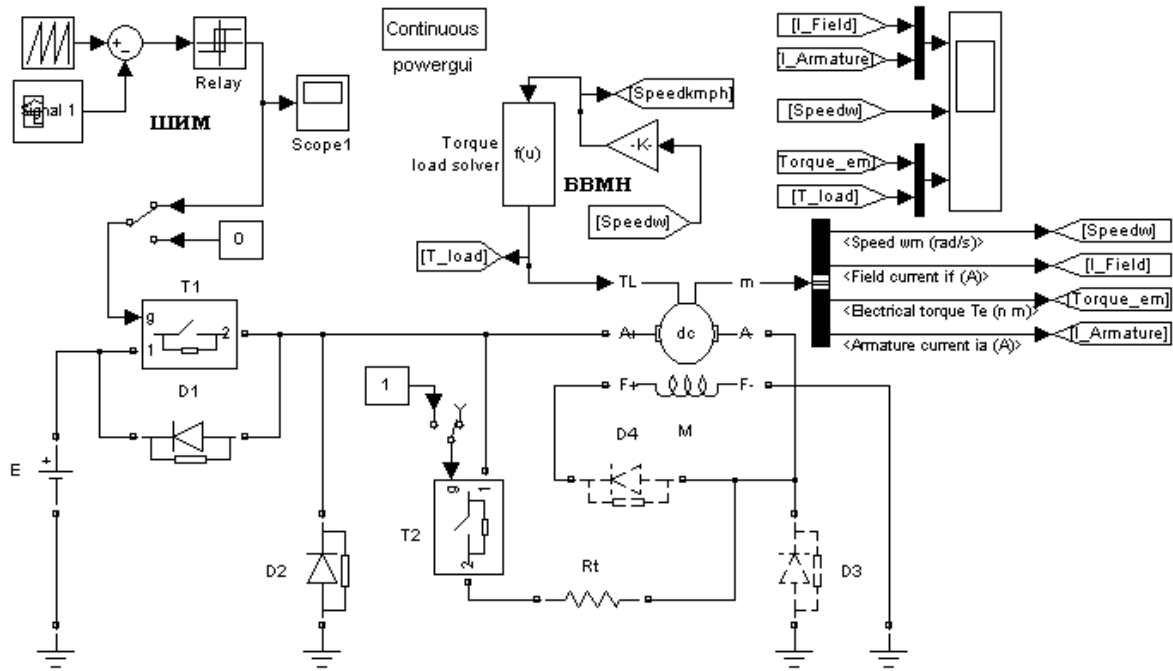


Рисунок 3.2 – Імітаційна модель модернізованої схеми імпульсного регулювання ДПЗ

Позначення на схемі (рис. 3.2):

E – джерело контактної мережі;

K1 – силовий ключ;

K2 – силовий ключ, що підключає гальмівний резистор R_t ;

D2 – діод зворотного струму;

M – двигун постійного струму послідовного збудження;

ШИМ – блок, що забезпечує управління силовим ключем K1;

BBMH – блок, який обчислює момент навантаження двигунів M;

D3, D4 – діоди, що вводяться до схеми при дослідженні модернізованої системи імпульсного регулювання частоти обертання двигуна M (позначені пунктиром).

Для порівняння характеру динамічних процесів розроблено імітаційну модель реостатного пуску ДПЗ (рис. 3.3).

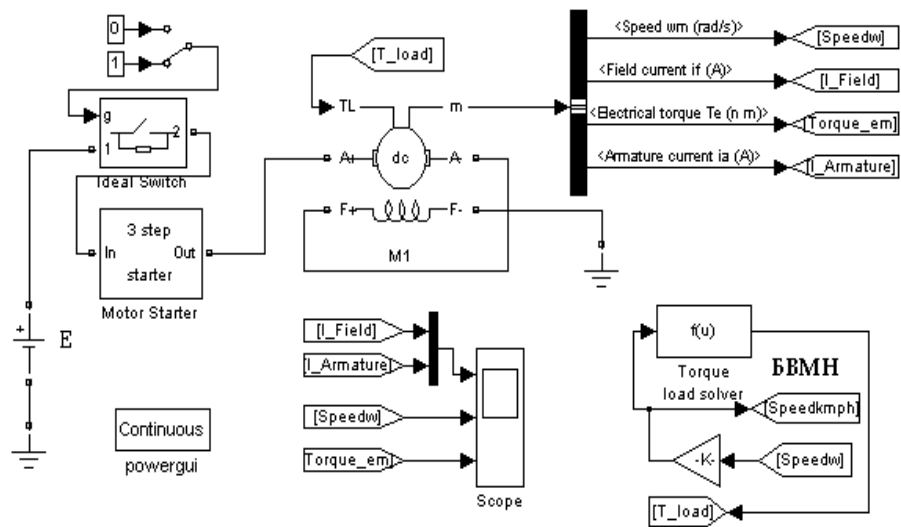


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель реостатного пуску ДПЗ

Позначення на схемі (рис. 3.3):

- E – джерело живлення (напруга джерела живлення дорівнює 750В);
- Motor Starter – пусковий реостат, що забезпечує чотири ступені регулювання;
- M1 – двигун постійного струму послідовного збудження;
- БВМН – блок, що обчислює момент навантаження двигуна M1.

Результати дослідження реостатного пуску, проведеного на моделі (рис. 3.3), представлені на рис. 3.4.

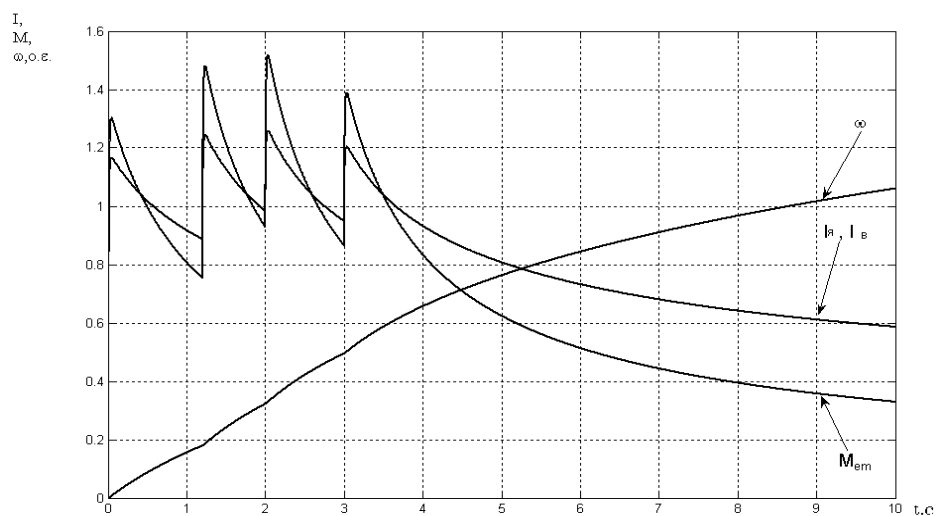


Рисунок 3.4 – Результати дослідження схеми реостатного пуску ДПЗ

З рис 3.4 видно, що максимальний момент при пуску досягав $1,5 \cdot M_{\text{ном}}$, а мінімальний $0,8 \cdot M_{\text{ном}}$, що призводить до підвищених механічних зусиль у з'єднувальних елементах двигуна та колісної пари, а також в обмотках двигуна. Такі пульсації моменту сприяють прискореному зносу ізоляції обмоток якоря та збудження [48], зносу редуктора, а також можуть призводити до пробуксовки колісних пар.

За допомогою моделі (рис. 3.2) проведено дослідження класичної (рис.3.1,а) та модернізованої (рис.3.1,б) схем імпульсного регулювання. Результати моделювання наведені на рис. 3.5,а (для класичної схеми) і рис. 3.6,б (для модернізованої схеми), де I_a – струм якоря двигуна; I_b – струм збудження двигуна; $M_{\text{ем}}$ – електромагнітний момент двигуна; ω – кутова частота обертання двигуна.

У класичній схемі регулювання частоти обертання (рис. 3.1,а) швидкість загасання струму якоря визначається постійною часу кола якоря [46]. На інтервалі, коли К1 увімкнений, струм наростає за колом: силовий ключ К1 – обмотка якоря М1 – обмотка збудження $W_{зб}$. Коли К1 вимикається, струм спадає за колом: діод D2 – обмотка якоря М1 – мережа живлення.

При введенні в схему діода D3 (рис. 3.1,б) струм збудження замикається по контуру: шунтувальний діод D3-D4 – обмотка збудження $W_{зб}$. Результати моделювання підтверджують, що запропонована модернізація схеми дозволяє збільшити час спадання струму в обмотці збудження двигуна постійного струму у 8 разів (рис. 3.7). Це так само сприяє повільнішому спаданню магнітного поля в ДПЗ. Тому при зазначеному схемному рішенні можливо використовувати електродинамічне гальмування при самозбудженні електродвигуна. У той же час швидкість зростання (спадання) струму в обмотці якоря через вплив діода D3 визначається виключно параметрами якірного кола, що проявляється у збільшенні пульсацій (рис. 3.6).

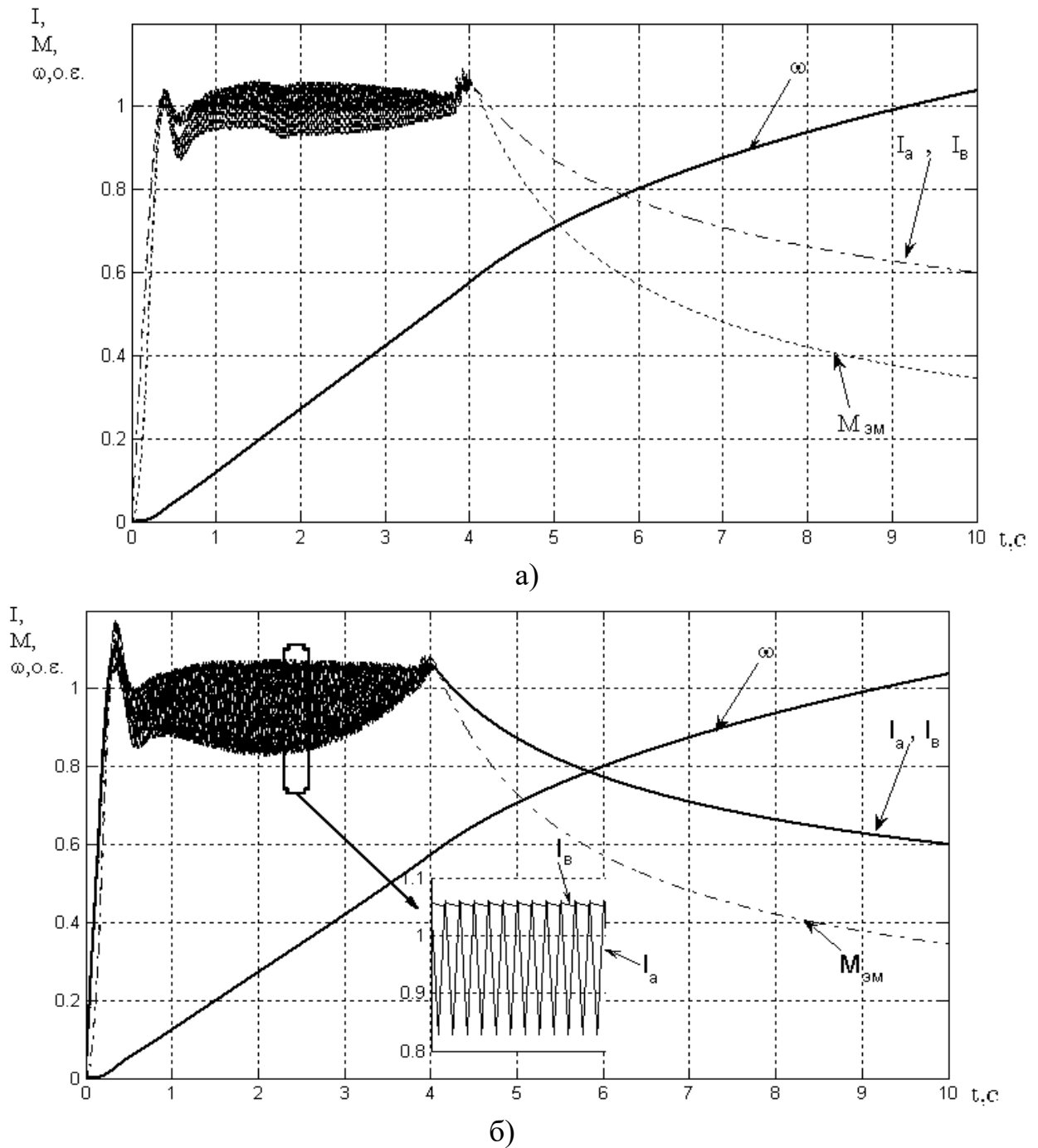


Рисунок 3.5 – Залежність електромагнітного моменту, частоти обертання та струмів якоря й обмотки збудження в режимах пуску (частота модуляції 300 Гц):
а) класична схема; б) модернізована схема

Осцилограма на рис. 3.5,б підтверджує гіпотезу про незмінність струму збудження, що було прийняте в розділі 2. Ця обставина дозволяє уникнути використання шунтуючого опору обмотки збудження для зменшення пульсацій струму збудження, що покращує ККД ДПЗ.

Зазначимо, що пульсації струму в якорі модернізованої схеми збільшені і становлять $I_{\text{я}}^* = (1,05 \div 0,85)$ при середньому значенні струму якоря $I_{\text{я}}^* = 0,95$. Середній струм збудження сягає $I_{\text{зб}}^* = 1,05$.

Водночас у схемі рис. 3.1,а пульсації струму якоря та збудження сягають $I_{\text{зб}}^* = (1,05 \div 0,9)$ при середньому струмі якоря та збудження $I_{\text{я}}^* = 0,975$.

Таким чином, середній пусковий момент визначається як:

$$M \equiv I_{\text{я}} \cdot \Phi_{\text{зб}} \quad (3.1)$$

Для ненасиченої магнітної системи обмотки збудження відносний момент ДПЗ визначається як:

– для схеми (рис. 3.1,а):

$$M \equiv I_{\text{я}}^* \cdot I_{\text{зб}}^* = 0,975 \cdot 0,955 = 0,93; \quad (3.2)$$

– для схеми (рис. 3.1,б):

$$M \equiv I_{\text{я}}^* \cdot I_{\text{зб}}^* = 0,95 \cdot 1,05 \approx 1,0. \quad (3.3)$$

Отже, при пуску в модернізованій схемі момент збільшується приблизно на 7%.

Для насиченої системи відносний електромагнітний момент у схемі (рис. 3.1,б) $I_{\text{зб}}^* \approx 1,0$, а зростання моменту сягає приблизно 2%:

$$M \equiv I_{\text{я}}^* \cdot I_{\text{збн}}^* \approx 0,95 \cdot 1,00 \approx 0,95. \quad (3.4)$$

Комп'ютерні діаграми залежності середніх значень електромагнітних моментів та частоти обертання для класичної та модернізованої схем при пуску ДПЗ наведені на рис. 3.6 [34].

Аналіз залежностей, отриманих на лабораторному стенді (додаток А, рис. 3.6) підтверджує результати аналітичних досліджень моментів ДПЗ (3.2)÷(3.4) в схемах рис. 3.1,а та рис. 3.1,б.

Збільшення електромагнітного моменту призводить до зростання пускової частоти обертання валу на більшій частині пускового моменту, що сприяє підвищенню прискорення електропоїзда приблизно на 5%, особливо в зоні $(0,3 \div 0,8)\omega_H$.

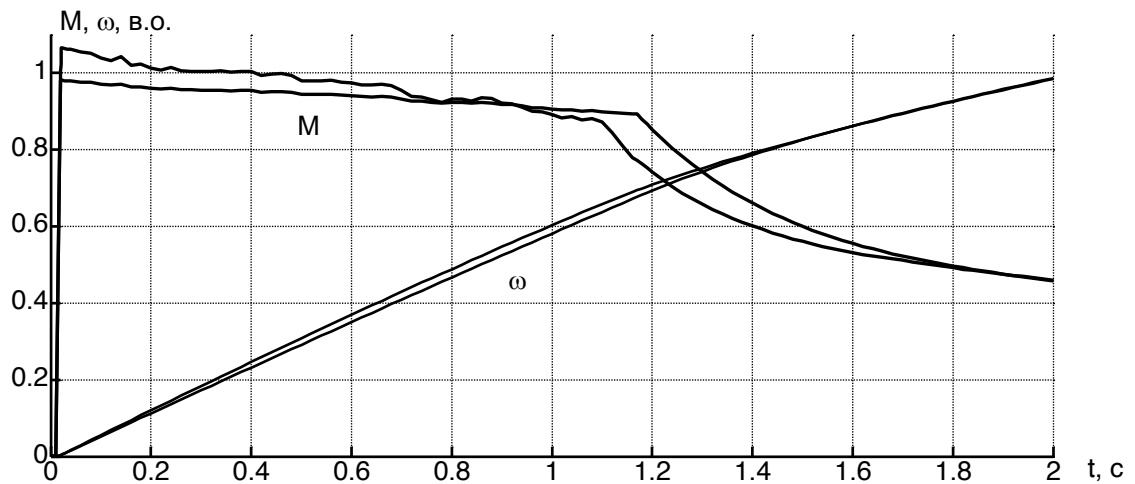


Рисунок 3.6 – Залежність середніх значень електромагнітних моментів та частоти обертання ДПЗ при пуску на експериментальному стенді

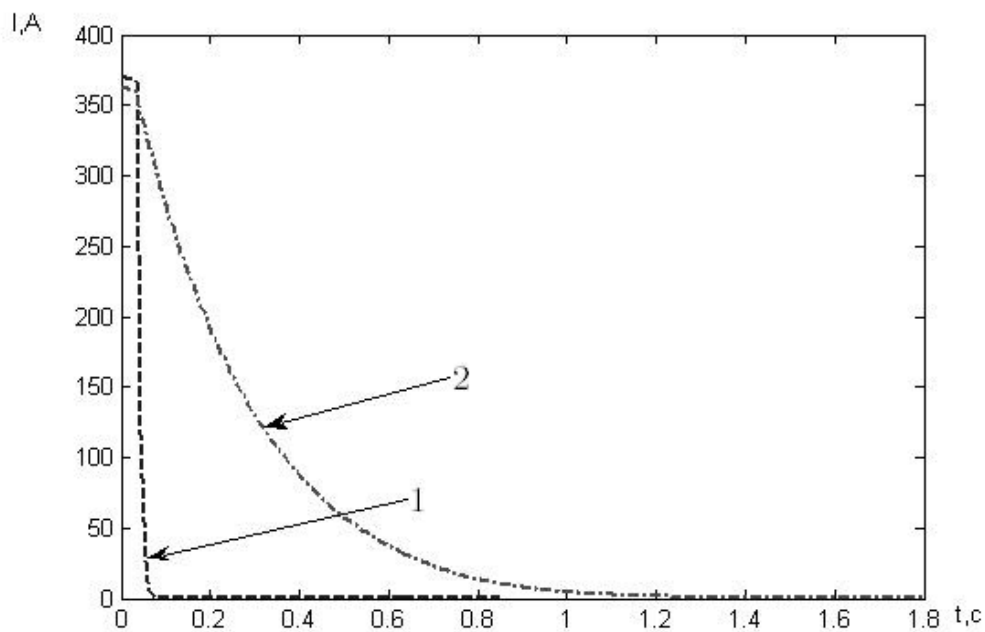


Рисунок 3.7 – Графік спадання струму в обмотці збудження:

1 – без діода D3-D4 (рис. 2.1,а); 2 – з діодами D3-D4 (рис. 2.1,б)

Аналіз кривих рис. 3.6, рис. 3.7 створює передумови для реалізації схемного рішення, що дозволяє відмовитися від використання додаткових незалежних джерел струму для обмотки збудження тягового електродвигуна при переході з режиму руху під струмом у режим електродинамічного гальмування, а також зменшити кидки струму при відриві пантографа.

Це покращує ефективність використання електричної енергії та зменшує втрати електроенергії за рахунок зменшення втрат у додаткових джерелах живлення, а також скорочує собівартість та експлуатаційні витрати на ремонт незалежного джерела струму.

На рис. 3.8 зображені результати дослідження модернізованої імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму в режимах розгону, вибігу і електродинамічного гальмування. При моделюванні було задано такі режими:

- у момент часу $t=0$ розпочато розгін електродвигуна;
- у момент часу $t=8,6$ с відключається подача живлення на двигун, що ініціює режим вибігу;

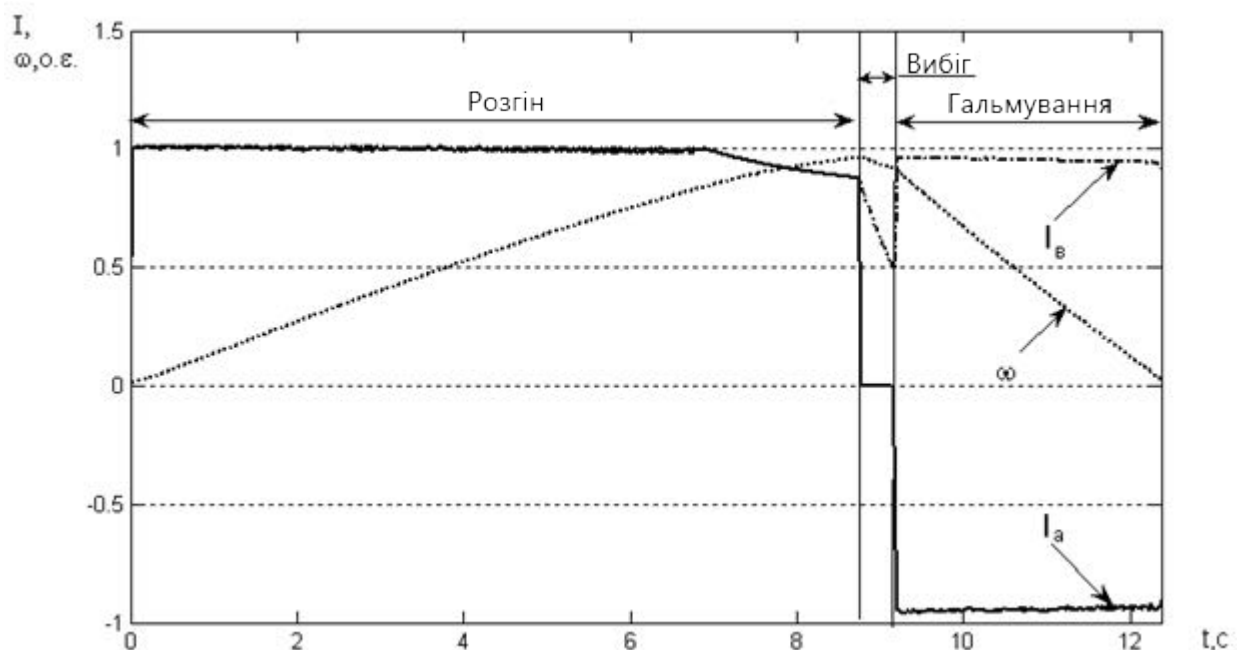


Рисунок 3.8 – Результати дослідження модернізованої імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму в режимах руху, вибігу, електродинамічного гальмування (частота комутації 1500 Гц).

– у момент часу $t=9,2$ с ввімкнення силового ключа К2 в якірний ланцюг вводиться гальмівний резистор R_t ;

– розрахунок здійснюється до моменту повної зупинки якоря електродвигуна ($\omega^*=0$).

Зазначимо, що режим у проміжку часу $t=8,6\div 9,2$ с. на рис. 3.8 можливий при відриві пантографа або утворенні ожеледі на окремих ділянках тягової мережі.

Наведені залежності показують можливість реалізації режиму електродинамічного гальмування електродвигуна без застосування додаткових засобів підтримки струму в обмотці збудження ДПЗ.

На запропонованій моделі було проведено дослідження модернізованої схеми при різних частотах комутації силового ключа К1 у діапазоні від 300 до 1500 Гц. Результати дослідження вказують, що зменшення пульсацій струму якоря досягається підвищенням частоти комутації до 450-1500 Гц.

Це дозволяє відмовитися від використання допоміжного згладжувального реактора у колі якоря, що зменшує втрати в магнітній системі якоря від пульсацій струму якоря та підвищити надійність роботи ДПЗ.

Однак підвищення частоти модуляції ключа К1 призводить до підвищення втрат у ключі К1.

У розділі 2 зазначено, що в сталому режимі при $\omega > \omega_n$ втрати в ключі К1 та діоді D4 можна зменшити, шунтуючи їх контакторами КМ1 та КМ2. Це дозволяє підвищити ККД електропередачі.

Режим роботи контактора КМ1 потрібно синхронізувати з роботою ключа К1, щоб забезпечити бездугове вмикання та вимикання контактора. Режим роботи контактора КМ2, що шунтує діод D4, автоматично стає менш навантаженим.

Доцільність шунтування ключа К1 контактором КМ1 визначається стабільністю напруги в контактній мережі. При частих коливаннях напруги у контактній мережі використання КМ1 стає недоцільним, оскільки якір ДПЗ стає

незахищеним від підвищеної напруги в контактній мережі, що призводить до збільшення струму якоря та інтенсифікації іскріння колектора ДПЗ.

Шунтування діода D4 у сталому режимі руху є більш доцільним, оскільки це зменшує пульсації струму якоря завдяки додатковому індуктивному опору обмотки збудження.

Аналіз комп'ютерних осцилограм показує, що наявність діодів D3 та D4 дозволяє суттєво покращити роботу електропередачі в разі відриву пантографа завдяки збереженню достатнього потоку збудження, коли струм якоря може спадати до нуля.

3.2 Дослідження режимів гальмування в модернізованій схемі ДПЗ на імітаційних моделях

Дослідження електромеханічних процесів у модернізованій схемі, зображеній на рис. 3.9, під час рекуперативно-реостатного гальмування проводилося на створеній для цього завдання імітаційній моделі (рис. 3.10).

Позначення елементів схеми на рис. 3.9:

- E – джерело живлення (значення напруги дорівнює 750В);
- L1, C1 – індуктивність та ємність вхідного фільтра відповідно;

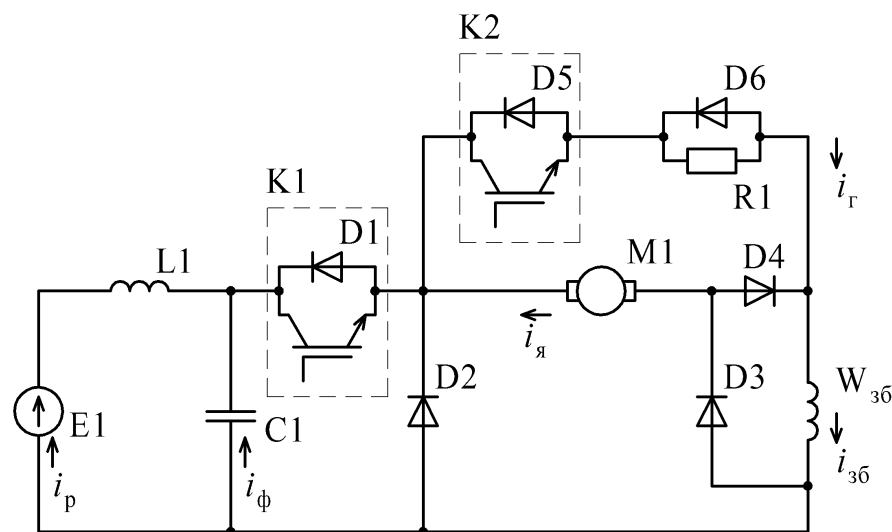


Рисунок 3.9 – Модернізована схема імпульсного рекуперативно-реостатного гальмування ДПЗ

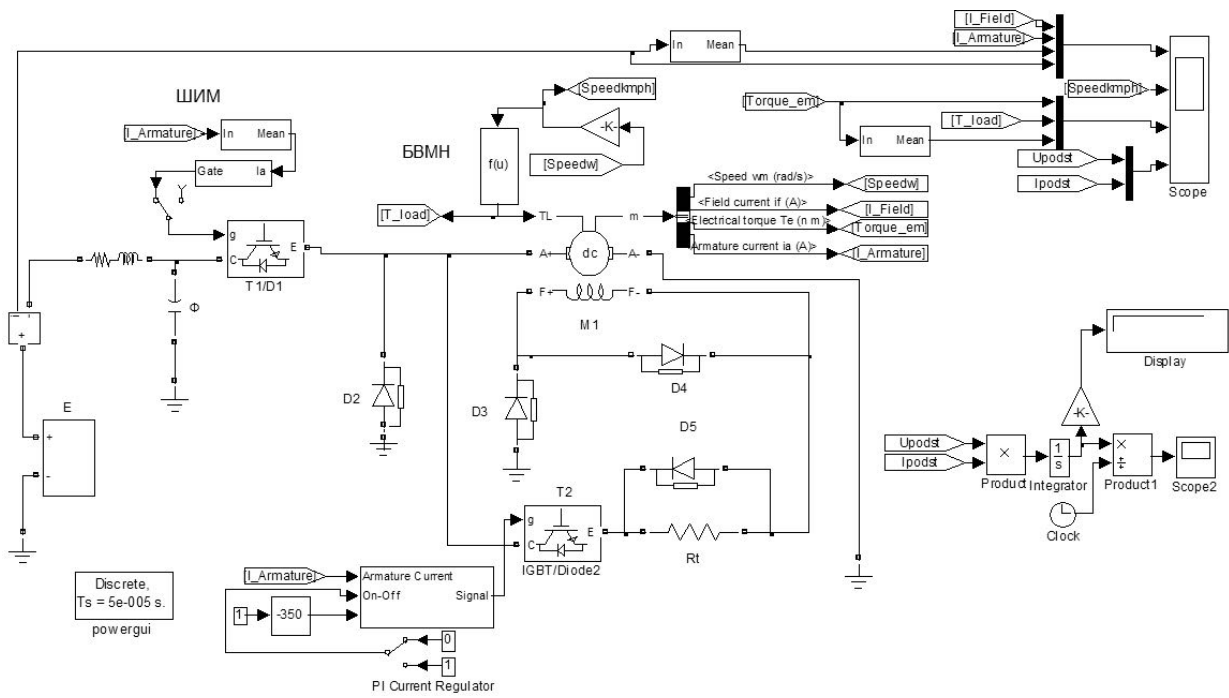


Рисунок 3.10 – Імітаційна модель модернізованої схеми в режимі рекуперативно-реостатного гальмування ДПЗ

- K1/D1 – силовий ключ;
- K2 – силовий ключ, що вмикає гальмівний резистор R1;
- D2, D3 – діоди зворотного струму;
- M1 – двигун постійного струму послідовного збудження;
- ШИМ – блок широтно-імпульсної модуляції, що керує силовим ключем K1;
- БВМН – блок обчислення моменту навантаження двигуна M1;
- D3, D4 – діоди, що вводяться в схему при дослідженні модернізованої схеми імпульсного регулювання частоти обертання двигуна;
- Pi Current Regulator – імпульсний регулятор струму гальмування.

Дослідження проводилося за допомогою програмного пакету Matlab і застосування бібліотеки SimPowerSystem. При моделюванні не враховувався вплив реакції якоря. Нелінійність кривої намагнічування визначалась табличним методом відповідно до методики [49].

Параметри імітаційної моделі було задано відповідно до двигуна 1ДТ-003.5У. Номінальні параметри тягового двигуна 1ДТ-003.5У: напруга $U=750$ В, потужність $P=235$ кВт, сила струму $I=345$ А, частота обертання $n=1250$ хв⁻¹, маса $m=2300$ кг. Усі розрахунки й графіки розрахованих залежностей наведені у відносних одиницях. За базові значення прийнято: електромагнітний момент $M=5$ кН·м; кутова частота обертання $\omega=130$ рад/с; струм $I=345$ А.

Розглядається режим, за якого контактна мережа може приймати потужність гальмування.

У результаті моделювання електромеханічних процесів ДПЗ у режимі динамічного гальмування, що відбувається від номінальної частоти обертання, отримано графічні залежності, наведені на рис. 3.11: струмів якоря $I_{\text{я}}$, збудження $I_{\text{зб}}$ і рекуперації $I_{\text{р}}$. Дослідження показують, що в інтервалі часу 0-0,7 с виконується гальмування зі струмом рекуперації, що досягає номінального значення струму якоря двигуна. Далі на інтервалі часу 0,7-5,5 с струм рекуперації зменшується через зниження ЕРС якірної обмотки внаслідок зменшення частоти обертання якоря ДПЗ. Після часу 5,5 с струм рекуперації дорівнює нулю, і система переходить у режим реостатного гальмування.

У режимі гальмування регулятор струму підтримує ключем К2 струм якоря ДПЗ на постійному рівні (рис. 3.11).

На рис. 3.12 показані залежності середнього значення електромагнітного моменту ($M_{\text{ЕМ}}$) та кутової швидкості (ω) ДПЗ в режимі динамічного гальмування. Як видно, у режимах рекуперативного гальмування ($t = 0-0,7$ с) і рекуперативно-реостатного гальмування ($t=0,7-7,5$ с) ДПЗ розвиває номінальний гальмівний момент. При реостатному гальмуванні момент плавно зменшується і в точці $t = 7,8$ с стає рівним нулю, а залишкова частота обертання якоря становить 8% від номінального значення.

На ділянці залишкової частоти обертання вмикається механічне (пневматичне) гальмування.

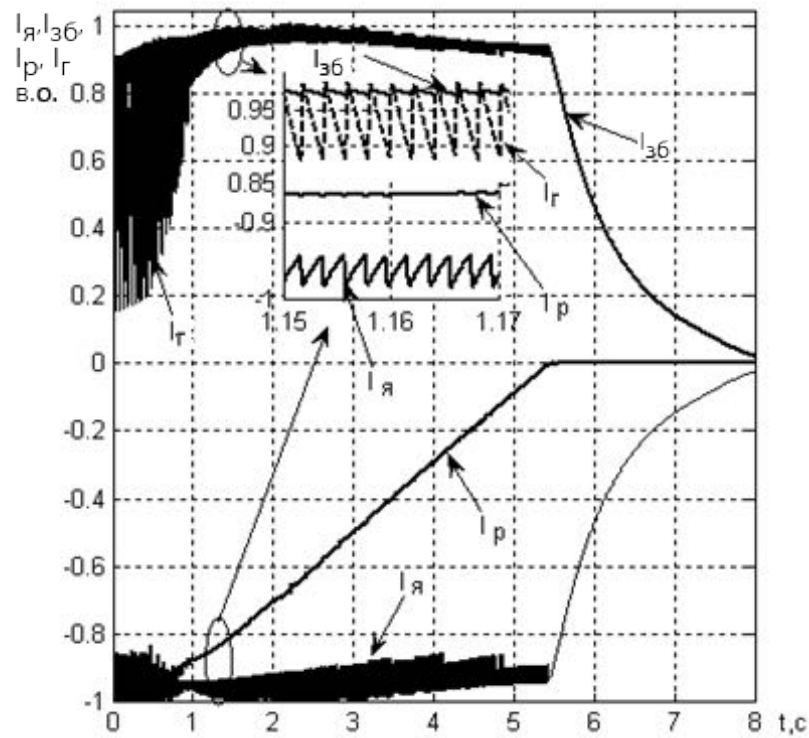


Рисунок 3.11 – Залежності для струмів якоря $I_{\text{я}}$, збудження $I_{\text{зб}}$, рекуперації $I_{\text{р}}$ та струму I_{r} в гальмівному резисторі R_1

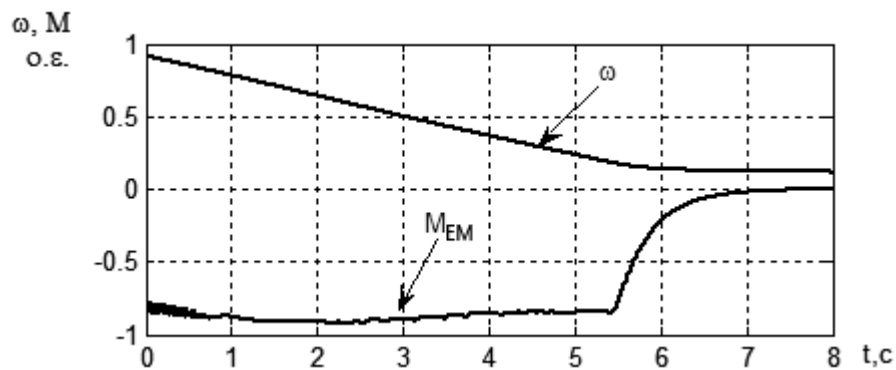


Рисунок 3.12 – Залежність середнього значення електромагнітного моменту та кутової швидкості ДПЗ

Алгоритм забезпечує час гальмування, який співвідноситься із часом пуску двигуна з незалежним збудженням, що сприяє зменшенню довжини гальмівного шляху.

Застосування способу широтно-імпульсного регулювання (ШІР) струму якоря і збудження зумовлює імпульсну зміну струму рекуперації з амплітудою, що дорівнює номінальному значенню струму якоря (крива $I_{\text{ф}}$ на рис. 3.13).

Передача таких пульсацій струму в контактну мережу неприпустима, тому необхідна установка і певний підбір параметрів вхідного C1L1-фільтра.

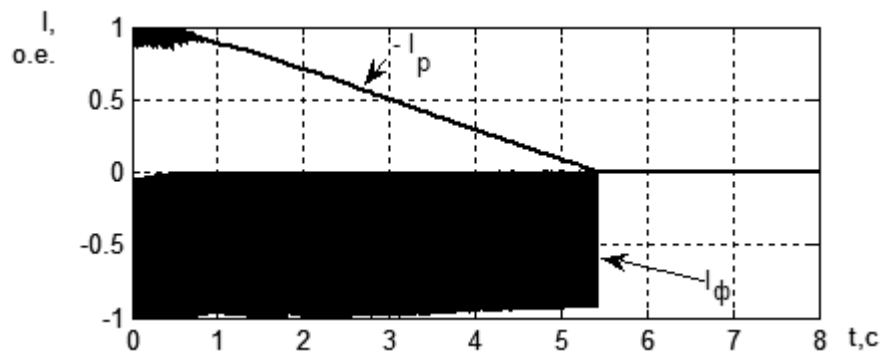


Рисунок 3.13 – Ілюстрація згладжування пульсацій струму рекуперації вхідним C1L1-фільтром

При дослідженні було застосовано згладжувальний фільтр із параметрами елементів: $L1 = 11,8$ мГн та $C1 = 1500$ мкФ. Як видно з рис. 3.13, струм рекуперації I_p в режимі рекуперативного гальмування після згладжування фільтром має пульсації амплітудою менше 10% від номінального струму якоря двигуна і частотою, рівною частоті роботи ШПР (у цьому випадку 1500 Гц). При подальшому зниженні частоти обертання якоря ДПЗ та переході його в режим рекуперативно-реостатного гальмування пульсації струму I_p зменшуються. Таким чином, необхідним є введення в схему фільтра додаткової ланки для придушення залишкових пульсацій струму рекуперації I_p .

Також проведено аналіз режимів роботи діодів D3 та D4 при роботі схеми в режимі динамічного гальмування (рис.3.14), який показав, що діод D3 працює зі струмом, амплітуда якого дорівнює номінальному струму гальмування, а діод D4 – із подвійною амплітудою струму (що необхідно враховувати при проектуванні цієї схеми).

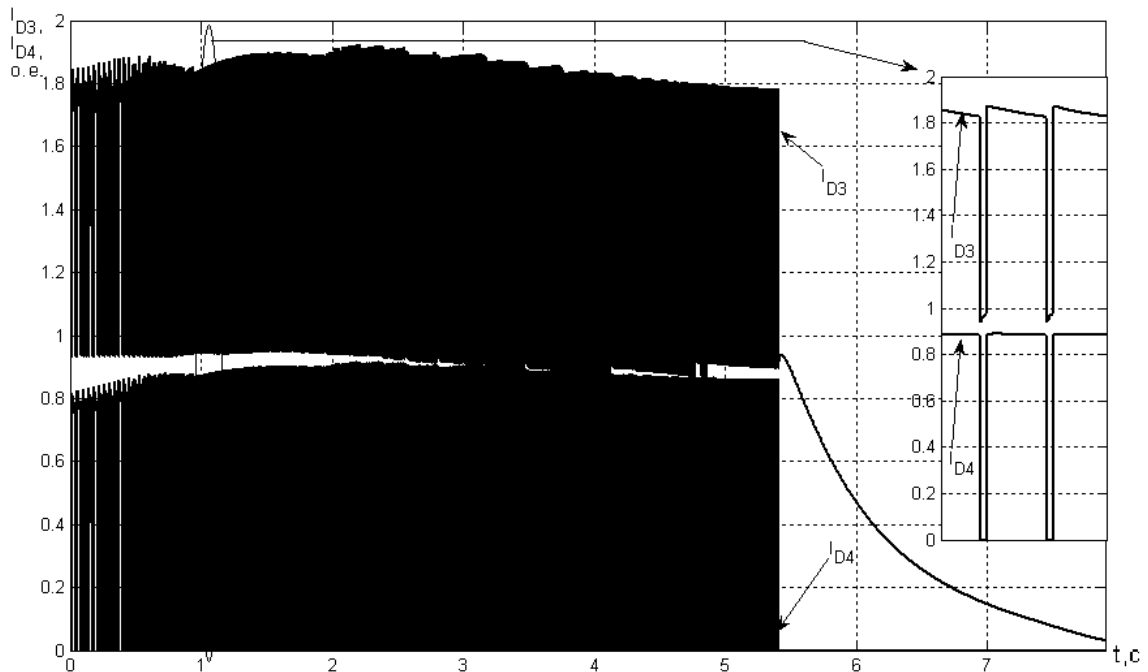


Рисунок 3.14 – Залежності струмів через діоди D3 та D4 при роботі схеми в режимі динамічного гальмування

3.3 Дослідження режиму буксування колісних пар тягового електроприводу з ДПЗ

Буксування – це явище проковзування колеса залізничного транспорту, яке виникає через перевищення тягової сили, що діє на колесо, над силою зчеплення колеса з рейкою. Цей режим є особливо небезпечним, оскільки під час його виникнення утворюються повзуни та мартенсит у зонах теплового впливу, що призводить до прискореного зносу і значного скорочення терміну служби коліс, рейок, а також збільшує ймовірність їх пошкодження.

Тому актуальним завданням є розробка ефективних методів, засобів та систем, які реалізують можливість захисту від виникнення режиму буксування колісної пари.

Наразі на рухомому складі залізниць України дуже широко застосовується система, яка визначає режим буксування на підставі показників датчиків напруги, що вимірюють ЕРС якорних обмоток тягових електродвигунів. Система управління, виходячи з порівняння різниці показників датчиків з опорною

напругою, видає сигнал на пульт машиніста про виникнення вказаного режиму. На основі цього сигналу активується система підсіпання піску, за рахунок чого підвищується коефіцієнт зчеплення системи «колесо–рейка» і режим буксування припиняється. Проте в певних умовах (наприклад, при сильному забрудненні рейок) цього може бути недостатньо, і тоді потрібне зниження електромагнітного моменту тягового двигуна буксуючої колісної пари. Це в наявних контактних електротехнічних тягових комплексах рухомого складу постійного струму досягається зниженням якірного струму всіх тягових електродвигунів за рахунок пониження машиністом позиції тягового контролера і, відповідно, введення в ланцюг додаткових пускових резисторів, або пониження напруги імпульсним регулятором у безконтактних електротехнічних тягових комплексах [50]. Після цього режим буксування припиняється, на пульт машиніста подається сигнал про припинення зазначеного режиму, а потім машиніст підвищує позицію тягового контролера і продовжує ведення поїзда в нормальному режимі, якщо режим буксування не виникає знову.

Зазначена система має деякі недоліки, основні з яких полягають у наступному:

- низька швидкодія, викликана, перш за все, необхідністю участі машиніста в роботі системи;
- необхідність зниження струму всіх тягових двигунів при виникненні режиму буксування, що при важких умовах пуску (сильний підйом, значне забруднення рейки) може призвести до порушення графіку руху складу, що неприпустимо.

Для дослідження режимів буксування була розроблена імітаційна модель, яка дозволяє дослідити електромагнітні та електромеханічні процеси, що виникають при роботі вдосконаленої схеми широтно-імпульсного регулювання струму тягових електродвигунів рухомого складу постійного струму [51, 52, 53].

Принципова схема реалізації системи захисту від режиму буксування наведена на рис. 3.15

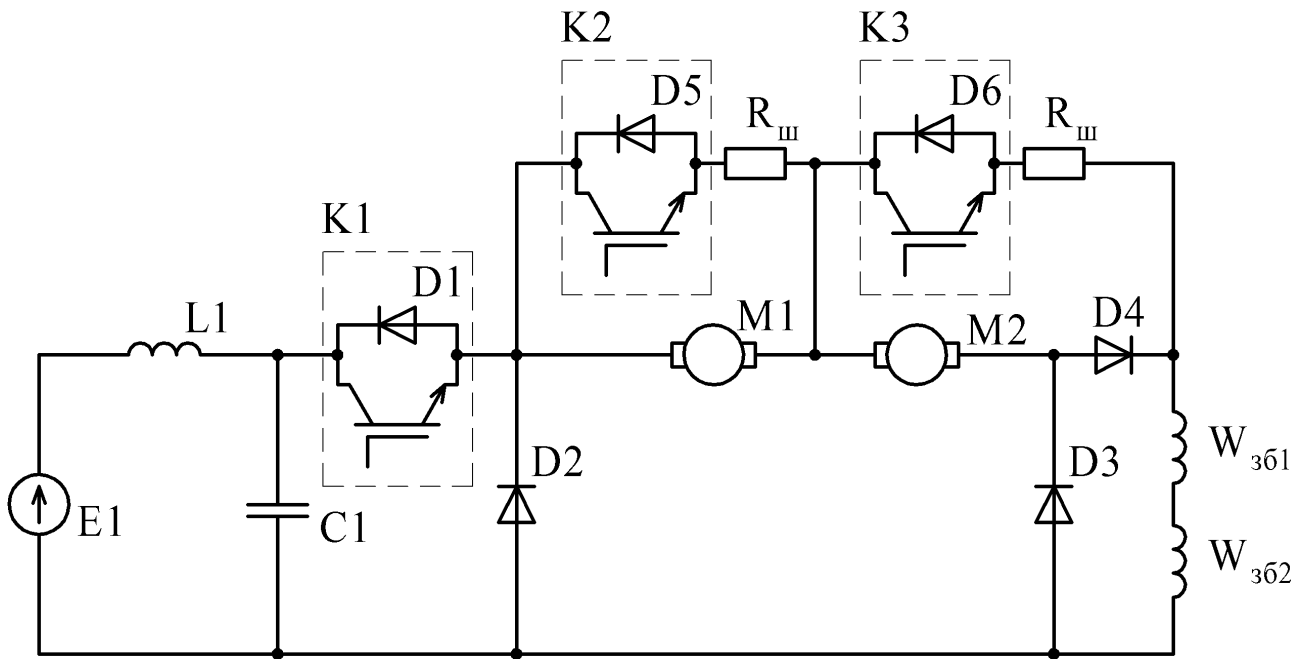


Рисунок 3.15 – Принципова схема реалізації системи захисту від режиму буксування

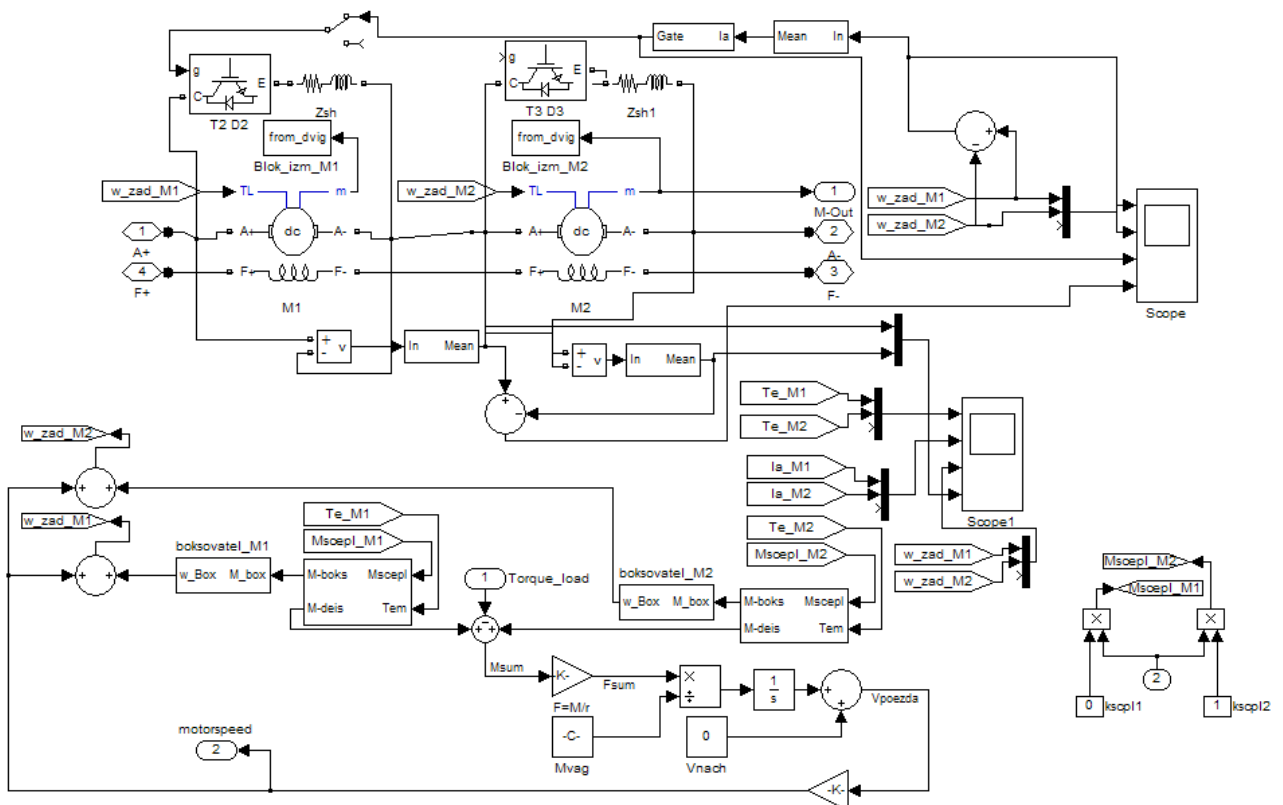


Рисунок 3.16 – Імітаційна модель дослідження режиму буксування

Імітаційна модель (рис. 3.16) реалізована в середовищі Matlab із застосуванням бібліотеки SimPowerSystem.

Вона дозволяє проводити моделювання наступних режимів: розгін електропоїзда при різних уставках обмеження струму тягових двигунів, розгін і рух електропоїзда за різних коефіцієнтів зчеплення в системі «колесо–рейка», буксування колісних пар у разі перевищення сили тяги над силою зчеплення в системі «колесо–рейка».

На рис. 3.17 представлені результати моделювання режиму рушання електропоїзда при зниженому коефіцієнті зчеплення колеса з рейкою (константа k_{scpl1} на рис.3.16) у колісної пари першого тягового двигуна. Графіки залежностей наведені у відносних одиницях. За базові значення прийнято: номінальна частота обертання якоря ТЕД $\omega_n=60$ рад/с; номінальний струм якоря тягового двигуна $I_n=370$ А; напруга джерела живлення $U_{cn}=1650$ В, коефіцієнт зчеплення «колесо–рейка» $k_{scpl_nom}=0,35$. Під першим тяговим двигуном мається на увазі електрична машина DC Machine1 на рис.3.16, відповідно під другим – DC Machine2.

На рис. 3.17 наведені комп'ютерні осцилограми струмів якорів та напруг на колекторах двигунів M1 та M2 до моменту початку буксування.

Аналіз залежностей на рис. 3.17,б,в показує, що при розвитку режиму буксування змінюється розподіл падіння напруги на колекторах тягових двигунів. Як видно з рис. 3.17,б,в, при постійному струмі якоря неузгодженість швидкостей тягових електродвигунів становить 10%, а неузгодженість напруг – 6%. Таким чином, можна створити антибуксувальну систему, яка буде перешкоджати утворенню режиму буксування при зниженні сили зчеплення колеса з рейкою. Як вихідні дані для роботи вищевказаної системи краще використовувати показання датчиків швидкості тягових електродвигунів. Принцип роботи системи полягає в такому: при виникненні неузгодженості швидкостей якорів електродвигунів відповідним силовим ключем шунтується якірна обмотка того двигуна, частота обертання якого вище.

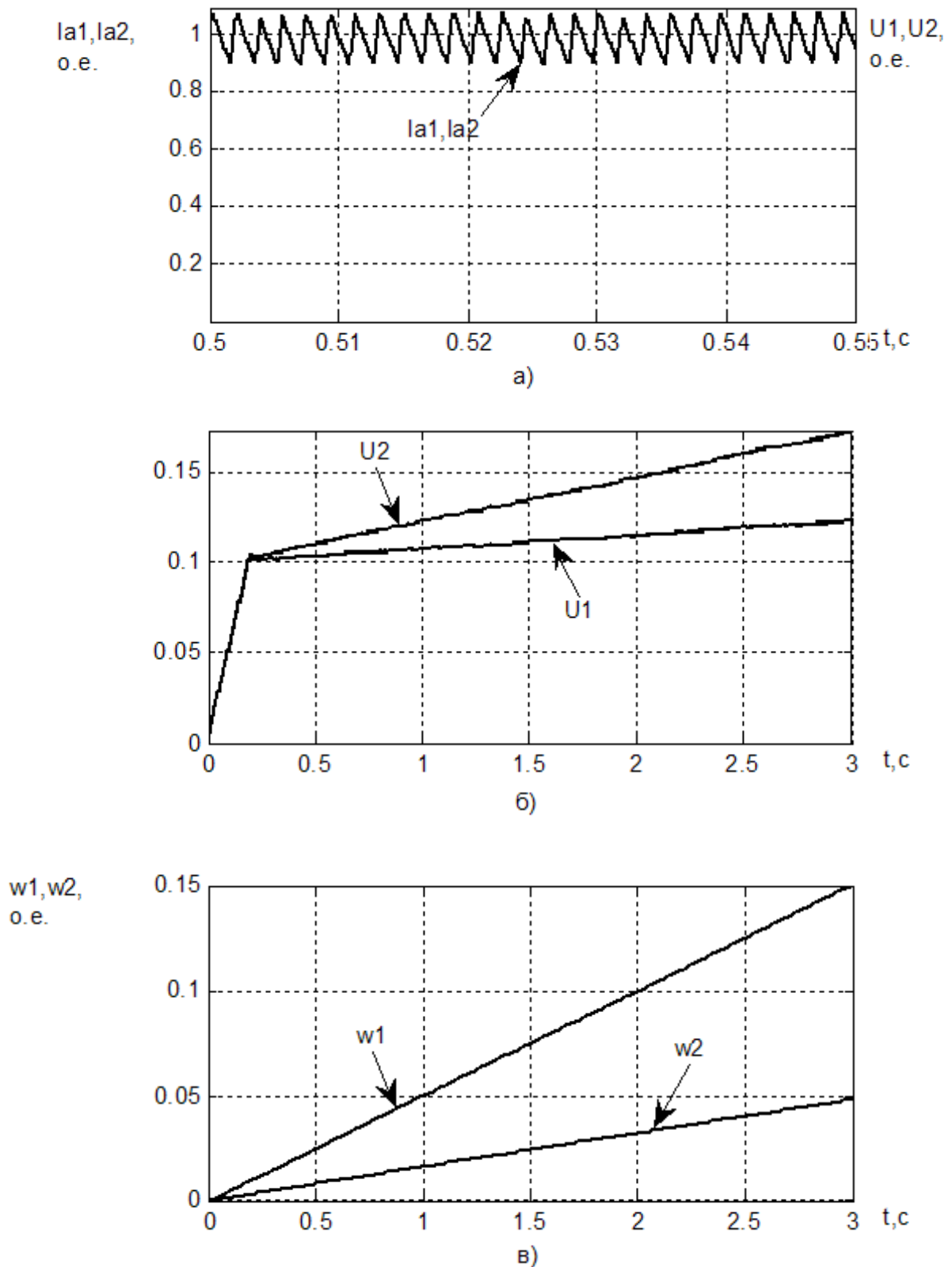


Рисунок 3.17 – Графічні залежності, що відображають результати моделювання режиму рушання електропоїзда: а) струми якоря першого (I_{a1}) і другого (I_{a2}) тягових двигунів (збільшений масштаб за часом); б) падіння напруг на якорях першого (U_1) та другого (U_2) тягових двигунів; в) кутові швидкості обертання якорів першого (U_1) та другого (U_2) тягових двигунів.

Для припинення буксування колісної пари необхідно зменшити електромагнітний момент електродвигуна, який її обертає. Для електродвигуна постійного струму при послідовній схемі включення електромагнітний момент буде прямопропорційним струму якоря. Тому для зниження електромагнітного моменту достатньо знизити струм якоря електродвигуна. Для цього якір електродвигуна за допомогою силового ключа шунтується опором R_{sh} . Щоб оцінити вплив R_{sh} на зниження струму якоря з урахуванням дії проти-ЕРС E_1 тягового електродвигуна, розглянемо схему заміщення (рис. 3.18).

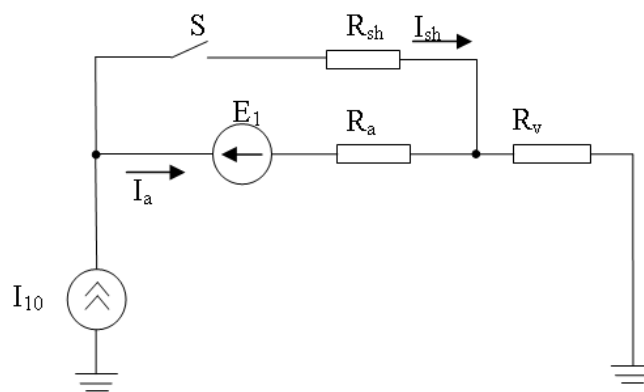


Рисунок 3.18 – Схема заміщення тягового електродвигуна при шунтуванні обмотки якоря

Позначення на схемі: I_{10} – джерело струму, що імітує підтримку струму імпульсним регулятором; R_a – опір обмотки якоря; R_{sh} – опір шунта, R_v – опір обмотки збудження, S – силовий ключ, яким здійснюється комутація шунта.

Коли шунт вимкнений, струм у ланцюзі якоря дорівнює струму I_{10} . При увімкненому шунті струм якоря описується співвідношенням:

$$I_a = \frac{R_{sh} \cdot I_{10} - E_1}{R_{sh} + R_a}. \quad (3.5)$$

Покажемо вплив E_1 і R_{sh}/R_a на струм якоря у вигляді поверхні (рис. 3.19). Дані представлені у відносних одиницях. За базові значення прийняті номінальний струм, опір обмотки якоря тягового електродвигуна.

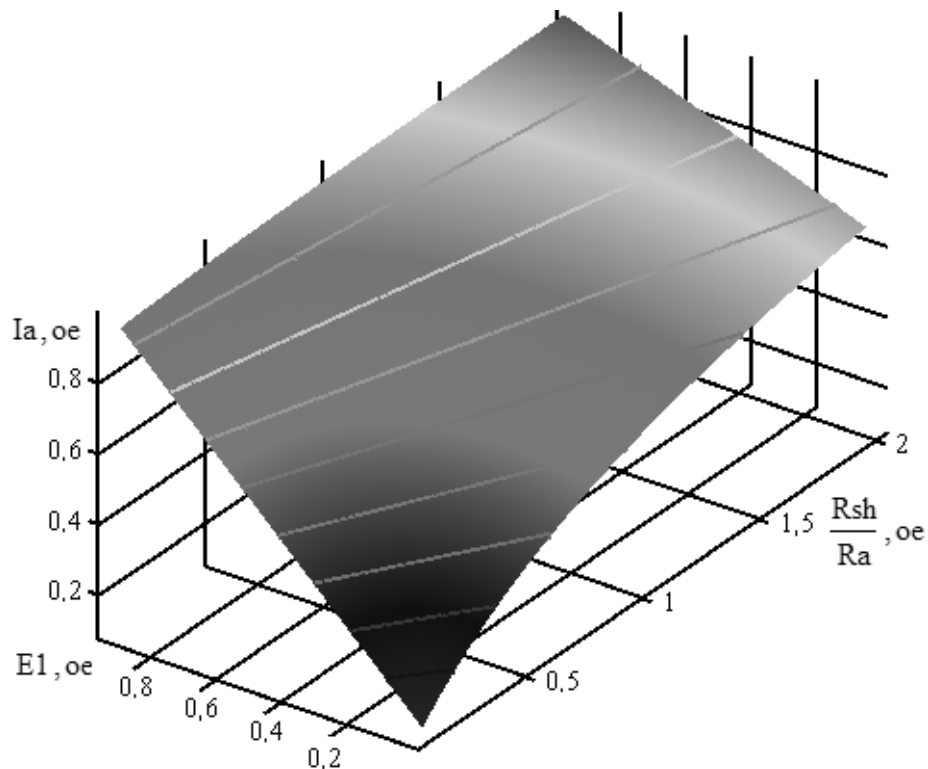


Рисунок 3.19 – Графічна залежність, що описує вплив проти-ЕРС двигуна E_1 і величини опору шунта R_{sh} на струм якоря I_a тягового електродвигуна.

Наведена залежність показує, що для забезпечення ефективної роботи схеми при пуску, а отже, для зниження струму якоря тягового електродвигуна і відповідно зниження його електромагнітного моменту, необхідно, щоб співвідношення R_{sh}/R_a перебувало в межах від 0 до 0,2. Для гальмування з постійним струмом потрібно мати $R_{sh} \approx (1,5 \div 2,0) R_a$, тому відношення R_{sh}/R_a забезпечується щільністю роботи ключів К2 та К3.

Результати моделювання режиму рушання електропоїзда при зниженому коефіцієнті зчеплення колеса з рейкою і ввімкненою антибоксовальною системою наведені на рис. 3.20.

Також було проведено моделювання при значеннях коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою, рівних 0,7; 0,5 та 0. Результати моделювання показані на рис. 3.20–3.22.

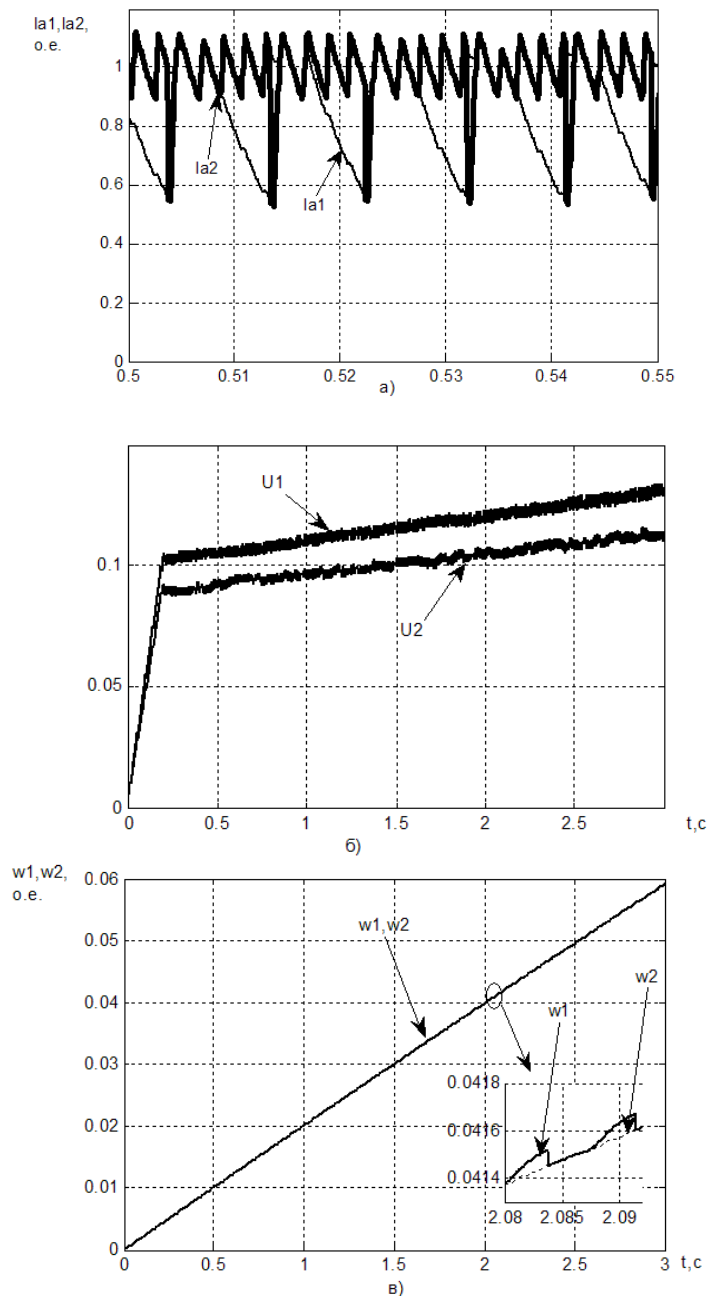


Рисунок 3.20 – Графічні залежності, що відображають результати моделювання режиму рушання електропоїзда при ввімкненій антибуксувальній системі ($k_{scr11}=0.7$): а) струми якоря (I_{a1}) і (I_{a2}); б) падіння напруг на якорях ($U1$) та ($U2$); в) кутові частоти обертання якорів ($w1$) і ($w2$) двигунів $M1$ та $M2$ відповідно

З рис. 3.20 видно, що струм якоря буксуючого двигуна спадає до значення $\approx 0,5 \cdot I_H$ за ≈ 3 періоди модуляції. Різниця частот обертання має пульсуючий характер. Відношення часу відхилення частот обертання до часу синхронного обертання приблизно дорівнює ≈ 1 .

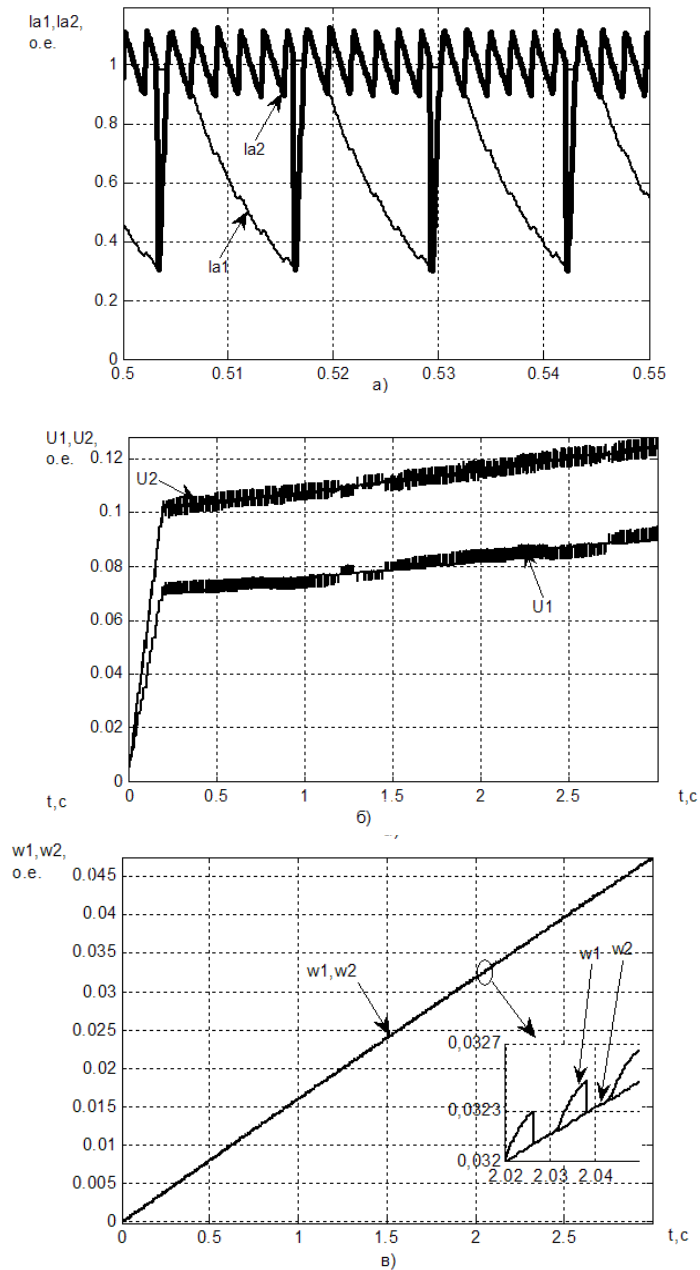


Рисунок 3.21 – Графічні залежності, що відображають результати моделювання режиму рушання електропоїзда при ввімкненій антибуксувальній системі ($k_{scr11}=0.5$): а) струми якоря (I_{a1}) і (I_{a2}); б) падіння напруг на якорях (U_1) та (U_2); в) кутові швидкості обертання якорів (w_1) і (w_2) тягових двигунів М1 та М2 відповідно

Аналіз рис. 3.21 показує, що при шунтуванні буксуючого двигуна його струм суттєво знизиться до значення $0,3 \cdot I_n$ за $\approx 4 \div 5$ періодів модуляції. Час несинхронного обертання зростає в півтора раза порівняно з рис. 3.20.

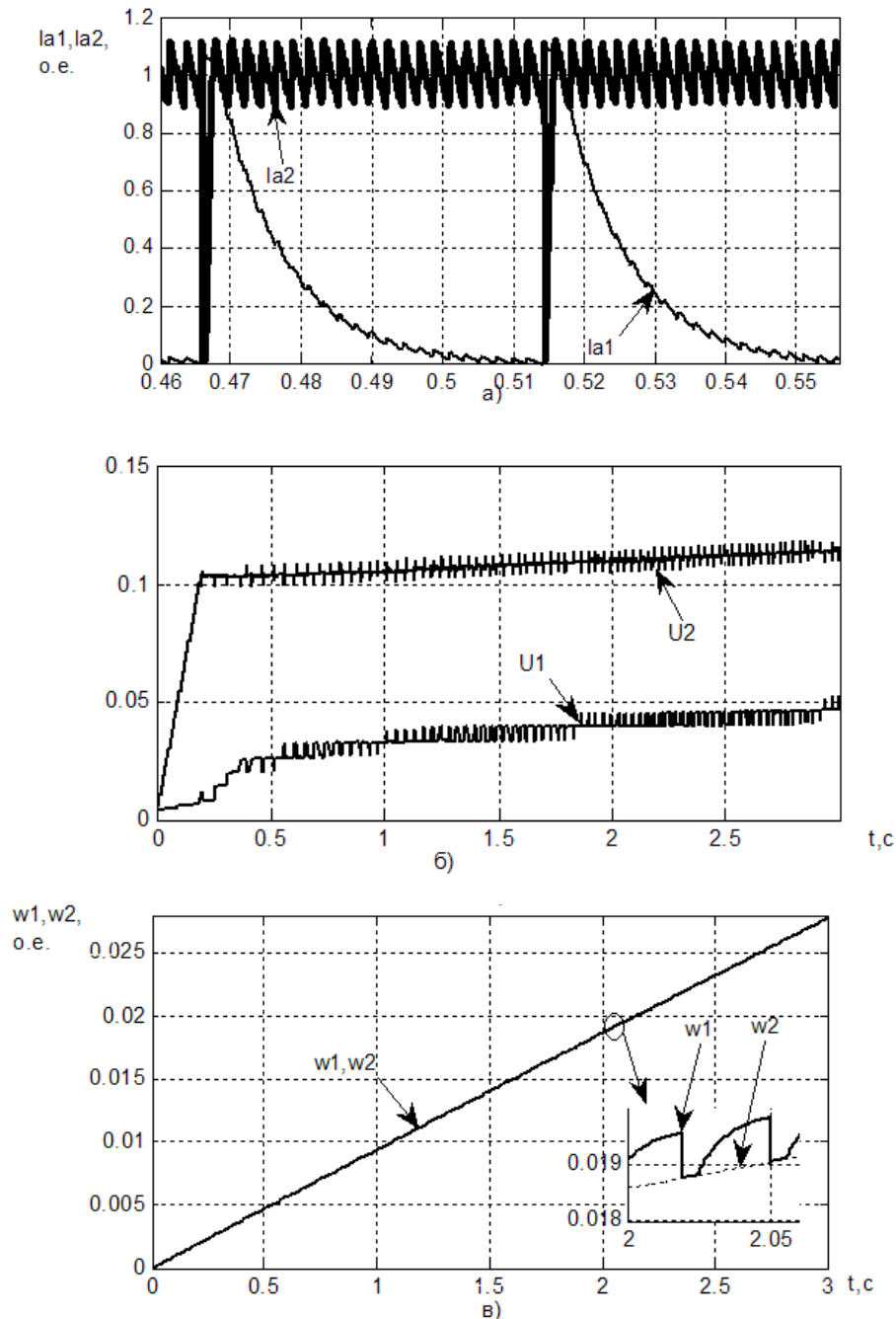


Рисунок 3.22 – Графічні залежності, що відображають результати моделювання режиму рушання електропоїзда при ввімкненій антибоксовальній системі ($k_{scpl1}=0$): а) струми якоря (I_{a1}) і (I_{a2}); б) падіння напруг на якорях (U_1) та (U_2); в) кутові швидкості обертання якорів (w_1) і (w_2) тягових двигунів М1 та М2 відповідно

При повному боксованні двигунів М1 та М2 час продовження боксовання зростає до 20 періодів частоти модуляції. Несинхронне обертання коліс набуває неперервного характеру із зростанням амплітуди розбалансу частот обертання.

На рис. 3.23 побудовані залежності відносної амплітуди зниження струму якоря ДПЗ, що буксує від коефіцієнта зчеплення $I_{я}^* = f(k_{scpl1})$ (рис. 3.23,а), відносної річної частоти обертання $\omega_1^* - \omega_2^* = f(k_{scpl1})$ (рис. 3.23,б), відносної різниці напруг $U_1^* - U_2^* = f(k_{scpl1})$ (рис. 3.23,в).

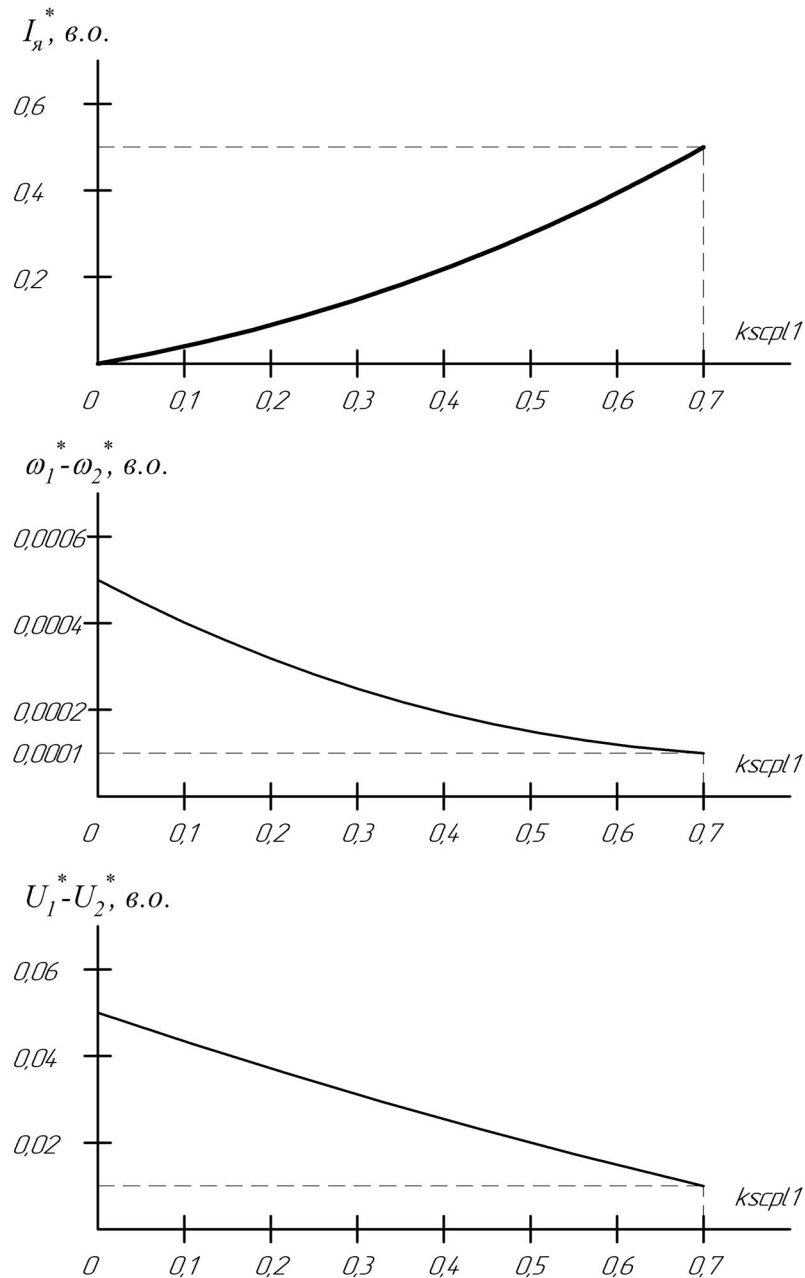


Рисунок 3.23 – Залежності відносно значень коефіцієнта зчеплень:

Як видно з представлених вище залежностей, при зниженні коефіцієнта зчеплення збільшується час роботи силового ключа, що шунтує обмотку якоря буксуючого тягового електродвигуна. Швидкість спадання струму в зазначеному

колі буде визначатися значенням активного опору, включеного послідовно з шунтуючим ключем і постійної часу якоря ТЕД. Вказаний алгоритм роботи дає можливість запобігати виникненню буксування колісних пар з достатньо високою швидкістю. Відносна частота обертання змінюється в межах $0,06 \div 0,01\%$ при зміні коефіцієнта зчеплення $k_{scpl} = 0 \div 0,7$ відповідно.

3.4 Висновки до розділу 3

Розроблено імітаційні моделі, які дозволяють детально досліджувати електромагнітні та електромеханічні процеси в модернізованій схемі імпульсного керування ДПЗ у широкому діапазоні режимів: пуску, сталого руху, динамічного та рекуперативного гальмування, а також буксування колісних пар.

Проведено порівняльний аналіз найбільш поширених схем імпульсного регулювання швидкості обертання ДПЗ, який підтверджує вищу ефективність модернізованої схеми імпульсного регулювання. Збільшення електромагнітного моменту в режимах пуску становить 5-7% відсотків залежно від стану магнітної системи, що підтверджено експериментальними дослідженнями на лабораторному стенді.

Визначено, що за допомогою імітаційної моделі стає можливим визначення вимог до параметрів вхідного фільтру модернізованої схеми імпульсного регулювання, обрання опору і потужності гальмівних резисторів. Використання вказаних вимог при проектуванні фільтру знижує вплив імпульсного регулювання на живлячу мережу.

Проведений аналіз режимів роботи елементів модернізованої схеми імпульсного регулювання підтвердив, що особливу увагу необхідно приділяти правильності вибору параметрів діода, що шунтує обмотку збудження ТЕД. Встановлено, що цей діод працює з подвоєною амплітудою номінального струму гальмування, що слід враховувати при проектуванні.

Доведено, що модернізована схема імпульсного регулювання забезпечує динамічне гальмування з номінальним гальмівним моментом на валу ТЕД до швидкості обертання якоря, що становить 8% від номінальної.

Розроблено алгоритм захисту від буксування та досліджено режими буксування в модернізованій схемі імпульсного регулювання швидкості обертання ТЕД. Отримані нові залежності зміни параметрів двигунів, з'єднаних послідовно, від коефіцієнта зчеплення ходових коліс із рейками.

Теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили концепцію побудови модернізованої схеми, яка не потребує допоміжних джерел живлення обмотки збудження. Також доведено, що розроблені алгоритми дозволяють реалізувати в гальмівних режимах ДПЗ роботу, еквівалентну двигунам з незалежним збудженням.

РОЗДІЛ 4 ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У другому та третьому розділах було розглянуто можливість реалізації імпульсного регулювання швидкості обертання якоря тягового двигуна з послідовним збудженням із пусковими та гальмівними характеристиками, подібними до двигунів незалежного збудження, без використання додаткового джерела живлення.

Аналіз подальшого розвитку тягових електропередач електропоїздів постійного струму, проведений у першому розділі, вказує на перспективу використання як тягового приводу частотно-регульованих електроприводів, завдяки їх більш високим експлуатаційним показникам, незважаючи на їх більш високу похідну вартість.

З огляду на нинішній економічний стан України та необхідність оновлення застарілого парку електропоїздів актуальною є модернізація їх тягових електропередач на базі розробленої модернізованої схеми імпульсного регулювання. Проведені раніше дослідження підтверджують таку можливість. За рахунок використання наявної механічної частини моторних візків із двигунами постійного струму та відсутності потреби в додаткових джерелах живлення така модернізація є економічно доцільною. Вона дозволяє суттєво знизити початкові капітальні витрати та спростити реалізацію заходів із модернізації.

Другим ключовим аспектом при модернізації тягової електропередачі є оновлення схеми живлення джерел власних потреб. На сьогодні в більшості електропоїздів використовуються електромашинні перетворювачі постійно-постійного струму (тип ІПВ.6 та ІПВ.7 ризького виробництва) з ККД на рівні всього 63% при корисній потужності 38 кВт.

Існуюча в Україні тенденція капітальних ремонтів поєднує в собі також часткову модернізацію салонів вагонів у частині покращення їх інтер'єру та комфорту (вентиляція кондиціонування повітря) [1, 2]. У цьому контексті доцільним є оновлення джерела живлення власних потреб електропередачі. Це

дозволить зекономити електроенергію та збільшити корисну потужність до 50 кВт при незмінному рівні споживаної потужності від тягової мережі завдяки підвищенню ККД статичного перетворювача власних потреб.

Далі буде проведено порівняльний аналіз комплексу електротехнічного обладнання тягової передачі у складі тягових перетворювачів з двигунами постійного та змінного струмів й джерелом живлення власних потреб.

4.1 Побудова тягової електропередачі електропоїздів постійного струму з асинхронними двигунами

У сучасних тягових електропередачах швидкісних електропоїздів з асинхронними двигунами широко застосовується частотно-регульований електропривод у складі «трифазний мостовий інвертор – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором», який зображений на рис. 4.1. Це зумовлено необхідністю зменшення навантаження на вісь при збільшенні необхідної потужності тягових двигунів.

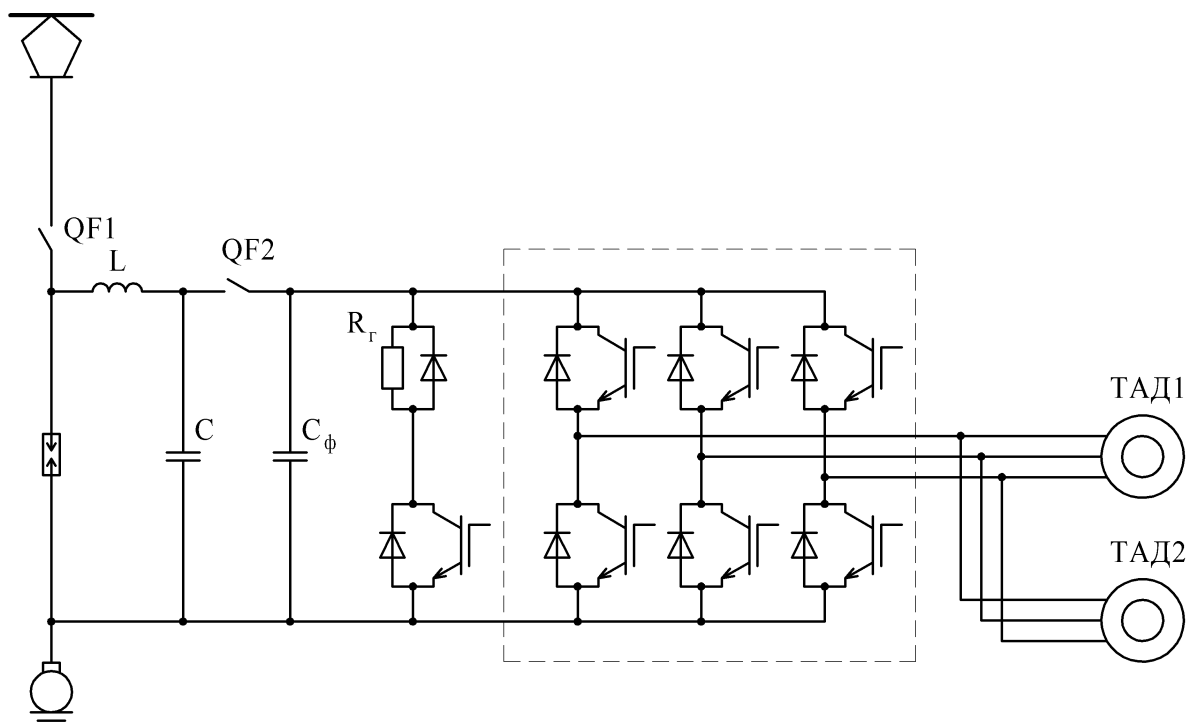


Рисунок 4.1 – Принципова схема тягової електропередачі з частотно-регульованим двигуном

Для реалізації електропередачі, еквівалентної існуючій на електропоїздах з двигунами постійного струму, необхідно мати новий моторний візок із двома асинхронними двигунами відповідної потужності.

Регулювання тягового моменту тягових асинхронних двигунів (ТАД) здійснюється тяговим інвертором за допомогою ШІМ-модуляції фазного струму статора. Водночас живлення ТАД моторного візка або вагона може відбуватися від одного тягового інвертора або двох тягових інверторів однакової потужності.

Живлення ТАД від одного інвертора потребує забезпечення ідентичності електромеханічних характеристик двигунів, а також зносу бандажів коліс моторних візків для забезпечення рівномірного навантаження ТАД та їх тягових моментів для запобігання буксування та юзу коліс моторних візків у динамічних режимах пуску або гальмування [54].

Таке рішення призводить до зростання потужності інвертора до $1000 \div 1200$ кВт у сталому режимі та $1600 \div 2000$ кВт у пусковому або гальмівному режимах. Це вимагає інтенсивного охолодження, яке зазвичай реалізується масляною або водяною системою.

При відносному зменшенні вартості інвертора та його габаритів цей підхід має певні недоліки:

- зниження загального тягового зусилля електропоїзда за рахунок суттєвого перерозподілу тягових моментів коліс моторних візків та моментів й опорів між колесами та рейками;

- в аварійному режимі вихід з ладу одного з інверторів (силових елементів або елементів системи керування) призводить до зниження тягового зусилля на $25 \div 20\%$ залежно від складу електропоїзда;

- примусове рідинне охолодження спричиняє збільшення експлуатаційних витрат на його обслуговування.

Використання індивідуальних інверторів для кожного ТАД збільшує габарити обладнання, вартість електропередачі приблизно на 25-30%, але має такі переваги:

- збільшення сумарного тягового зусилля за рахунок можливості гнучкого регулювання моменту ТАД у статичних та динамічних режимах;
- зменшення експлуатаційних витрат за рахунок застосування примусового повітряного охолодження;
- зменшення вимог до ідентичності електромеханічних характеристик ТАД і допуску на знос бандажів коліс моторних візків, що сприяє зменшенню витрат при поточних ремонтах електропоїздів.

Основним недоліком трифазного інвертора з ШІМ у схемі на рис. 4.1 є наявність значних пульсацій напруги на обмотках статора. Частота цих пульсацій залежить від режиму роботи ТАД.

У режимах пуску та роботи на частотах нижче основної, частота пульсацій визначається частотою модуляції ШІМ, яка, як правило, для потужних двигунів сягає 450÷600 Гц. Це призводить до підвищення втрат на перемикання ключів, втрат у сталі та нагріву обмоток статора двигуна.

Дослідження, проведені в [55, 56], показують, що при живленні несинусоїдальним струмом втрати в сталі статора при $f_s=50$ Гц підвищуються на 30%, струм неробочого ходу – на 32%, ККД знижується на 1,5%, $\cos\varphi_1$ – на 0,05, сумарний номінальний струм статора збільшується на 8%, ковзання – на 3%. Збільшення струму статора призводить до збільшення втрат у опорах джерела живлення і струмопроводах на 16% ($1,08^2=1,16$).

При частоті статора $f_s=10$ Гц електромагнітний момент двигуна складає половину від номінального моменту двигуна при потужності на валу ротора 10% від номінальної, що призводить до зниження ККД двигуна на 72% від номінального ККД при $f_s=50$ Гц [56].

Для високовольтних тягових частотно-регульованих електроприводів найбільш ефективним засобом покращення енергетичних характеристик є використання багатofазних перетворювачів та двигунів.

Застосування шестифазних перетворювачів частоти за схемою, наведеною на рис. 4.2, дозволяє зменшити втрати в сталі статора завдяки усуненню 5-ї та 7-

ї гармонік магніторушійної сили. Це дозволяє підвищити ККД двигуна на $1 \div 1,5\%$, залежно від потужності та частоти обертання ротора [57].

Використання двох послідовно включених інверторів (рис. 4.2) дозволяє застосовувати напівпровідникові прилади удвічі меншого класу й відповідно нижчої вартості. Вказана схема має меншу кількість напівпровідникових приладів, порівняно з трирівневим інвертором, та меншу встановлену потужність конденсаторів фільтра, за рахунок виключення з полюсів постійного струму третьої гармоніки [58] та зсуву частоти модуляції інверторів на півперіод.

При побудові нової електропередачі за схемою рис. 4.2 можливо використати досвід реалізації в Україні частотно-регульованого електроприводу для дизель-поїзда ДЕЛ-02 протягом 2010–2025 рр. на Львівській та Одеській залізницях. Як тяговий інвертор можна застосувати інверторний перетворювач МПЧ-2ТП-200/1,15К-110 У4 (виробник ТОВ «НДІ Перетворювач») з параметрами:

- номінальна напруга постійного струму – 1500 В;
- номінальна трифазна вихідна напруга – 3×1150 В;
- номінальний струм (діюче значення) – 200 А;
- максимальний струм протягом 10 хвилин – 300 А.

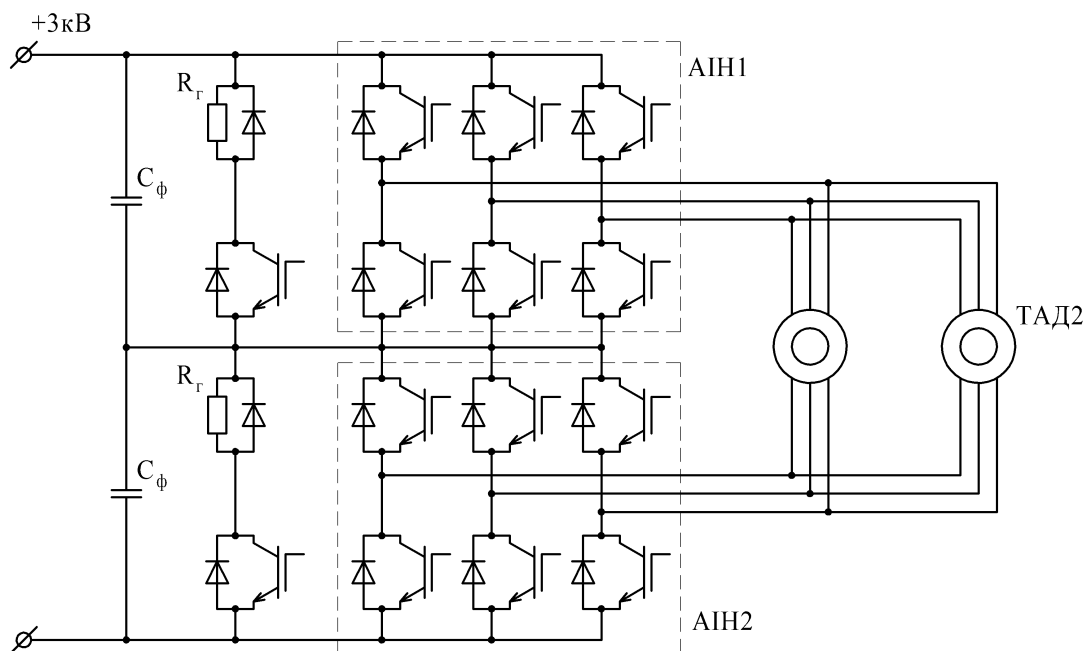


Рисунок 4.2, а – Принципова схема шестифазового тягового електроприводу з двообмотковими тяговими двигунами

Використання інвертора з дизель-поїзда ДЕЛ-02 дозволяє реалізувати тяговий привід одного моторного візка.

Доцільність використання вказаної схеми можна розглядати як перспективу підвищення напруги тягової мережі постійного струму до 4,5-6 кВ, на яку розрахована наявна апаратура, електрообладнання та наявні напівпровідникові прилади. Перехід на напругу 4,5-6 кВ на окремих напружених ділянках дозволить знизити у 2,2-4 рази втрати електроенергії в тяговій мережі та знизити у 1,5-2 рази втрати напруги.

Наявність IGBT модулів напругою 4,5-6,5 кВ дозволяє принципово підвищити напругу мережі до 6 кВ, що може стати одним з етапів переходу на живлення тягових мереж постійним струмом [3].

Першим етапом можливо використання підвищеної напруги на окремих напружених ділянках, за аналогією двосистемних електропоїздів подвійного струму. Реалізація такого підходу можлива за схемою, наведеною на рис. 4.2,б. У такій схемі ділянка з напругою мережі 3 кВ та 4,5-6 кВ розділяється ізоляційною вставкою, а інвертори з послідовного з'єднання перемикаються на паралельне за допомогою додаткових перемикачів К1, К2 та К3.

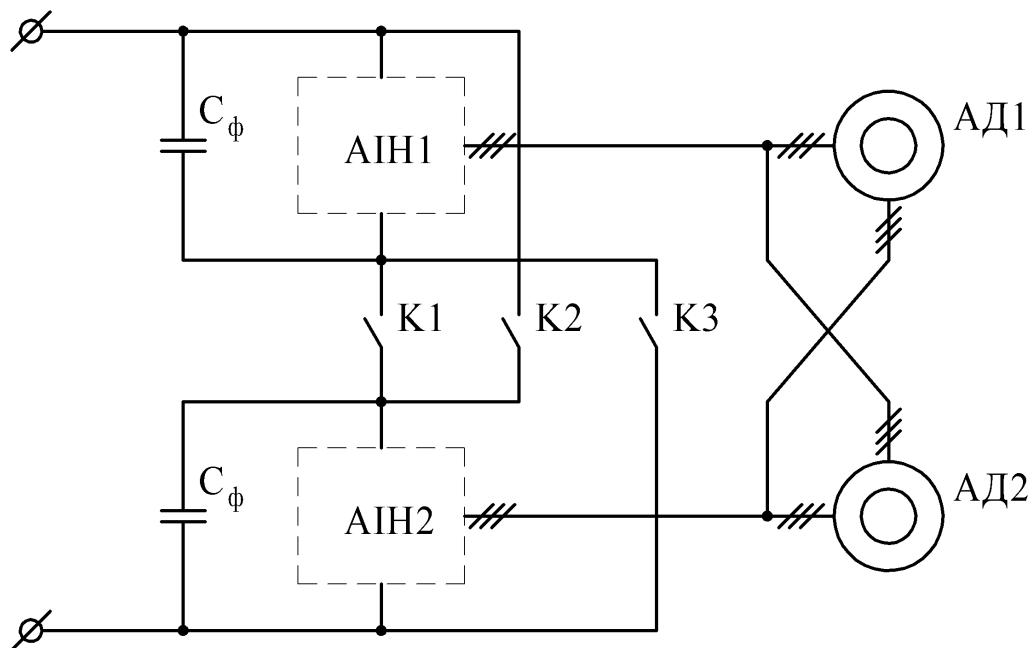


Рисунок 4.2,б – Принципова схема реалізації схеми зі змінною структурою (перемикання з послідовного на паралельне підключення інверторів)

4.2 Порівняльний аналіз модернізованої схеми з ДПЗ та тягового частотно-регульованого асинхронного приводу

У першому розділі було показано, що наявні тягові електропередачі з двигунами постійного струму послідовного збудження значно поступаються тяговим передачам з частотно-регульованим тяговим приводом на базі асинхронного тягового двигуна з короткозамкненим ротором за експлуатаційними характеристиками.

У другому та третьому розділах були розроблені модернізована схема та алгоритми керування швидкістю обертання якоря двигуна постійного струму (рис. 2.9), які дозволяють реалізувати необхідні режими роботи тягового електроприводу без допоміжних джерел живлення, що підвищує ККД електропередачі.

У четвертому розділі розглянуто найбільш поширену схему тягового електроприводу з частотно-регульованим асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором (рис. 4.1) для швидкісних електропоїздів.

Нижче проведено порівняльний аналіз розробленої модернізованої схеми з двигуном постійного струму послідовного збудження (без допоміжних джерел живлення обмотки збудження) та тягової передачі з частотно-регульованим приводом з ТАД.

Як об'єкти порівняння використовуються тягові двигуни 1ДТ-003.5У та АД-906У1 з потужністю відповідно 235 та 240 кВт і швидкістю обертання 1200 об/хв та 1000 об/хв.

Параметри порівняльного аналізу наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри порівняльного аналізу тягових електропередач для моторного вагона

№ з/п	Схема передачі Параметр	Модернізована з ДПС (рис.2.9)	Частотно-регульований АД (рис. 4.1)
1	Тип двигуна	1ДТ-003.5У	АД-906У1
2	Номінальна потужність, кВт	235	240
3	Номінальна напруга живлення, В	=3000	=3000
4	Номінальний струм, А	=235	4x80
5	Кількість двигунів, одиниць	4 послідовно	4 паралельно
6	Кількість перетворювачів, одиниць	1	1
7	Клас напівпровідникових приладів	60	60
8	Кількість IGBT модулів, одиниць	6	7
9	Кількість додаткових діодів, одиниць	2	1
10	Наявність контактної апаратури для реверсу, одиниць	2	–
11	Наявність енергозберігаючого контактора, одиниць	1 (2)	–
12	Маса двигуна, кг	4x2300	4x1600
13	ККД двигуна, %	91,5	93,4
14	Частота обертання, рад/с (об/хв)	138 (1250)	104,7 (1000)
15	Наявність допоміжних джерел живлення силових кіл при гальмуванні	–	–
16	Наявність перетворювачів власних потреб	Електромашинний, при модернізації напівпровідниковий	Напів-провідниковий

Аналіз табл. 4.1 показує, що для реалізації частотно-регульованого електроприводу необхідно розробити новий асинхронний двигун з потужністю 240 кВт зі змінною напругою 2500 (2700) В.

Зауважимо, що для реалізації схеми (рис. 4.2,б) може не знадобитись розробка нового асинхронного двигуна, але кількість напівпровідників зростає вдвічі при збереженні встановленої потужності.

Таким чином, з погляду модернізації тягової електропередачі за схемою (рис. 4.1) потрібна розробка (модернізація):

- тягового асинхронного двигуна;
- моторного візка;
- розробка тягового перетворювача (інвертора);
- розробка перетворювача власних потреб для заміни наявного електромашинного (ППВ.6 або ППВ.7).

Для модернізації тягової електропередачі постійного струму з ДПЗ та розробленою модернізованою схемою необхідна розробка:

- тягового перетворювача;
- перетворювача власних потреб.

Наявні моторні візки та двигуни постійного струму залишаються без змін. Зауважимо, що існує можливість покращення ККД ДПЗ шляхом використання спеціальної несиметричної обмотки збудження [57].

Застосування несиметричної компенсаційної обмотки дозволяє збільшити основний магнітний потік завдяки використанню магнітного потоку реакції якоря, рівномірного (практично синусоїдального потоку) в повітряному зазорі, що дозволяє зменшити повітряний зазор та магнітно-рушійну силу додаткових полюсів.

Для тягового ДПЗ з повноцінним реверсивним режимом економія міді становити 20%, що сприяє зменшенню маси та вартості ДПЗ, а ККД збільшується на 3%, за рахунок зменшення втрат у 2 рази в обмотках якоря і несиметричній обмотці збудження [57, 59, 60].

Отже, модернізація обмоток двигунів дозволяє підвищити ККД АД на 1% ($93,4 + 1 = 94,4$), а ДПС на 3% ($91,5 + 3 = 94,5$), що робить їх рівноцінними за номінальним ККД.

Необхідно відмітити, що приміські електропоїзди працюють з доволі частими пусками та гальмуваннями при роботі на приміському русі, тому важливо оцінювати інтегральні ККД двигунів при їх роботі. Інтегральний ККД суттєво впливає на ефективність при експлуатації тягових двигунів [54, 57, 58, 61]. Наприклад, порівняльні дослідження тягових двигунів ДПС ЕДУ-133 й АД ДАТ-305 потужністю 305 кВт, проведені на тепловозі потужністю 2200 кВт [61], виявили, що сумарні втрати в двигуні ДАТ-305 приблизно в півтора раза більше ніж у двигуні ЕДУ-133, що призвело до збільшення інтегрального ККД ДПЗ на 5% порівняно з АД [54, 57, 61].

Ця обставина пояснюється тим, що АД має змінні додаткові втрати при регулюванні швидкості методом ШПР, як показано в розділі 4.2, а також різним характером зміни струму двигунів при навантаженні.

Момент навантаження двигунів збільшується (зменшується) при зворотно-пропорційному зменшенні (збільшенні) швидкості руху електропоїзда. Втрати в двигуні постійного струму пропорційні квадрату струму якоря. Натомість у двигуні змінного струму втрати від повного струму зменшуються значно повільніше, тому що активна складова струму зворотно-пропорційна швидкості, а реактивна складова (в основному струм намагнічування) змінюється залежно від закону керування моментом. При законі $U/f_s = const$ струм намагнічування постійний, а при двозонному регулюванні струм намагнічування зворотно-пропорційний частоті струму двигуна. Тому результуючий струм статора сповільнюється значно менше порівняно з двигуном постійного струму, що призводить до збільшення втрат в АД й, відповідно, до зменшення його експлуатаційного інтегрального ККД. Ця обставина підтверджується також тим, що для вантажних тепловозів EDMGM серії 6.6 (швидкість 120 км/год) американська фірма General Motors використовує виключно тягові двигуни постійного струму, звертаючи значну увагу на якість виготовлення колекторів, збільшуючи їх періодичний огляд до 90 днів, а час між ремонтом колектору – до 4 років, що призводить до зменшення експлуатаційних витрат [62], зберігаючи відносно низьку собівартість передач.

Враховуючи вищезазначене, можна зробити такі висновки щодо вибору оптимальної схеми тягової електропередачі.

З огляду на режими експлуатації та потенціал підвищення ККД двигунів шляхом модернізації їхніх обмоток, інтегральні показники ККД обох типів двигунів є приблизно однаковими, а в певних режимах руху двигуни постійного струму можуть мати перевагу. Вартість перетворювачів для розглянутих схем практично не відрізняється, оскільки встановлена потужність і кількість напівпровідникових приладів є майже однаковими.

Тому вибір типу тягової передачі визначається співвідношенням капітальних витрат на розробку нових асинхронних двигунів, моторних візків і тягових перетворювачів, а також експлуатаційних витрат на їх обслуговування. За відсутності модернізації обмоток двигунів перевагу за інтегральним ККД для електропоїздів приміського сполучення мають двигуни постійного струму [57, 61].

Водночас для поїздів швидкісного руху (160 км/год і більше) доцільніше використовувати асинхронні двигуни, насамперед через їхню меншу масу, що зменшує навантаження на вісь моторних візків [5].

4.3 Вибір типу напівпровідникових приладів

У першому розділі наведені характеристики новітніх та поширених напівпровідникових приладів. Однак вибір типу приладу на базі оцінки їх статичних та динамічних втрат у номінальних режимах може призвести до неправильного висновку.

У роботах [62, 63, 64, 65, 66] значення якості покращення технологій визначається показником FOM (Figure of Merit) за формулою:

$$FOM = j_c \cdot (U_{sat} \cdot E_{off}), \quad (4.1)$$

де j_c – щільність струму, А/см²;

U_{sat} – напруга насичення при температурі $T_j=125^\circ\text{C}$, В;

E_{off} – втрати енергії при вимиканні при температурі $T_j=125^\circ\text{C}$, мДж/імпульс/А.

Вираз (4.1) дозволяє порівнювати прилади, виготовлені за різними технологіями, за однакових умов випробувань.

Однак для заданих умов експлуатації та паспортних даних виробника цей показник може суттєво відрізнятись. Крім того, у формулі (4.1) не враховуються втрати енергії при ввімкненні та режими охолодження приладів, що впливають на роботу приладу. Крім того, виробник не визначає площу чипів, що використовуються у приладі.

Тому використання виразу (4.1) не дає змогу споживачу повною мірою використати FOM як експлуатаційний показник якості приладу для їх порівняння.

Для практичного використання показника якості у виразі (4.1) доцільно j_c замінити на значення струму $I_{сн\text{ом}}$ з паспорту приладу (datasheet), який коригується за температурою структури, при якій нормується $I_{сн\text{ом}}$. Часто такі рекомендації даються в специфікаціях виробника із застосування приладів та залежностях струму від температури структури у графічному вигляді

Втрати потужності залежать від частоти, що визначаються за рівнянням:

$$P_{com} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f / \pi = E_{com} \cdot f / \pi, \quad (4.2)$$

де E_{com} , E_{on} , E_{off} – втрати енергії при комутації, ввімкнені та вимкнені відповідно;

f – частота комутації.

Значення E_{on} та E_{off} знаходяться для номінального струму з інформаційних матеріалів у вигляді графіків або рекомендованих виробником аналітичних виразів. Оскільки для різних приладів значення тестових параметрів відрізняється, доцільно ввести коригуючий коефіцієнт [63]:

$$K_{cor} = \frac{T_{jmax}^*}{125} \cdot \frac{I_c}{I_{cmax}} \cdot \frac{T_c}{T_{jmax}}, \quad (4.3)$$

де T_{jmax}^* – максимальне значення температури, при якому проведено тестування приладу ($T_{jmax}^*=125^\circ\text{C}$ або 150°C);

T_{jmax} – максимально допустиме значення температури напівпровідникової структури ($T_{jmax}=125^\circ\text{C}$, 150°C , 175°C);

T_c – температура основи приладу при тестуванні, $^\circ\text{C}$;

I_c – значення струму при тестуванні.

Враховуючи [57] та [67], показник якості буде мати вигляд:

$$\Pi_{я} = \frac{K_{cor}}{U_{cesat}} \cdot \frac{I_{снoм}}{E_{com}}. \quad (4.4)$$

Враховуючи, що в (4.4) входить показник U_{cesat} , який не повною мірою визначає втрати на інтервалі провідності, введемо показник повних втрат у приладі, тоді (4.4) матиме вигляд

$$\Pi_{я\Sigma} = \frac{K_{cor} \cdot I_{снoм}}{P_{sat} + P_{com}}, \quad (4.5)$$

де P_{sat} – втрати потужності у приладі на інтервалі провідності.

У табл. 4.2 наведено показники напівпровідникових приладів напругою 1700–6500 В зі струмом 800–1000 А.

Під час розрахунків прийнято, що модуляція інвертора відповідає синусоїдальному закону при коефіцієнті модуляції $\mu=0,8$, амплітуді вихідного струму $I_{ma} = I_{снoм}$, коефіцієнта потужності навантаження $\cos\varphi=0,85$ та частоти модуляції $f=2000$ Гц.

Аналіз табл. 4.2 показує, що модулі, які мали вищі показники за критерієм $\Pi_{я}$, зберегли свої відносні переваги за критерієм $\Pi_{я\Sigma}$ у межах своєї групи.

Винятком стали модулі 5SNA0600G650100, які виявили значно вищі відносні значення $P_{я\Sigma}$ порівняно з показником $P_{я}$. Це пояснюється співвідношенням втрат E_{sat} , E_{com} , U_{CESat} .

Таблиця 4.2 – Показники напівпровідникових приладів

U_{CES} , В	$I_{ном}$, А	Фірма	Тип приладу	I_c/T_c , А/°С	U_{CESat} , В	E_{com} , мДж	K_{cor}	$P_{я}$, А/В·мДж	P_{sat} , Вт	$P_{я\Sigma}$, А/Вт
1700	800	Infineon	FF800R17KE3	800/80	2,4	681	0,533	0,332	718	0,176
1700	800	ABB	5SND800M170100	800/80	2,6	700	0,533	0,298	1160	0,146
1700	800	Fuji	2MB1800U4G-170	800/80	2,6	726	0,533	0,288	1082	0,147
3300	800	Mitsubishi	CM800HC-66H	800/100	3,6	1370	0,667	0,069	1053	0,141
3300	800	Mitsubishi	CM800HB-66H	800/100	4,0	1401	0,667	0,0606	1157	0,135
3300	800	ABB	5SNA0800N330100	800/80	3,8	1675	0,533	0,0427	1127	0,095
4500	900	Mitsubishi	CM900HG-90H	900/100	3,7	4267	0,667	0,024	1200	0,0617
4500	900	Mitsubishi	CM900HB-90H	900/85	3,3	4267	0,567	0,023	1077	0,053
4500	800	ABB	5SNA0800J450300	800/85	3,55	4051	0,567	0,02	1036	0,05
6500	600	Infineon	FZ600R65KE3	600/80	3,7	5478	0,533	0,01	810	0,0272
6500	600	ABB	5SNA0600G650100	600/85	5,4	5027	0,68	0,0094	1186	0,0357
6500	600	Mitsubishi	CM600HG-130H	600/80	4,6	5605	0,533	0,0079	1077	0,026

Слід зауважити, що методологія порівняння за нормативним, інформаційним та тестовими показниками відображає технологічні та конструктивні особливості приладів.

Для реальних режимів роботи в конкретних схемах вказані чисельні показники можуть змінюватися за рахунок співвідношення параметрів навантаження у відповідних умовах охолодження. З огляду на це доцільно обирати тип модуля з урахуванням реальних параметрів, водночас забезпечуючи оптимальне співвідношення вартості та втрат, а також враховуючи масогабаритні вимоги.

4.4 Напрямок модернізації перетворювачів живлення власних потреб

Як зазначено в першому розділі, в наявних в Україні електропоїздах, що використовуються для приміських пасажирських перевезень, для живлення власних потреб використовують електромашинні перетворювачі типу ППВ.6 або ППВ.7, до складу яких входить двигун постійного струму та генератор змінного струму з системою стабілізації швидкості обертання двигуна та напруги генератора.

За номінальної потужності двигуна 50 кВт потужність генератора при $\cos\varphi=0,8$ становить 38 кВт, маса перетворювача – 1980 кг, а ККД – приблизно 63%. Наявність обертових частин (підшипники, колектор, щіткотримач) та низький ККД призводить до збільшення експлуатаційних витрат.

У сучасних закордонних та українських електропоїздах для живлення власних потреб електропоїздів використовують напівпровідникові перетворювачі з $\text{ККД}\approx 0,85\div 0,9$ і суттєво меншою масою. Підвищений ККД дає змогу, не збільшуючи споживання енергії з мережі, підняти корисну потужність живлення власних потреб до $50\div 55$ кВт, що дозволяє при модернізації покращити комфорт у салонах за рахунок кондиціонування та вентиляції повітря [68, 69].

Варіант схеми перетворювача власних потреб представлено на рис. 4.3. Перетворення напруги постійного струму виконується послідовно з'єднаними інверторами. Кількість інверторів залежить від типу обраного напівпровідникового приладу. Як ключі використовується IGBT модулі. Для перспективних потреб електропоїзда необхідна потужність власних потреб для живлення мережі 3×220 В (3×380 В), компресора на секцію електропоїзда становить 40–60 кВт залежно від заповненості салонів вагонів електрообладнанням.

За номінальної напруги струм, що споживається перетворювачем, сягає 13–20 А. При природному охолодженні потрібний струм модуля не перевищує $50\div 100$ А. Тому для реалізації перетворювача доцільно використовувати масові

IGBT номінальним струмом 100 А та напругою 1700 В, що забезпечує суттєве зменшення вартості.

Використання 4-каскадного перетворювача припускає, що максимальна напруга контактної мережі становить 6800 В, а робоча напруга на модулі $\approx 1000 \div 1100$ В. Роздільні трансформатори $Tr1 \div TrN$ завдяки високій частоті мають малі габарити та вагу. Наприклад, трансформатор, що використовується в дизель-поїзді ДЕЛ-02 при напрузі живлення 600 В, 2000 Гц має потужність 20 кВт при масі всього 15 кг, а випробувальна напруга становить 6 кВ. Як осердя використовується кільцевий сердечник, виконаний з монокристалічного сплаву ММ-11N. Наявність окремих трансформаторів і випрямлячів на кожному каналі забезпечує гальванічну розв'язку за напругою та запобігає зворотній трансформації енергії у разі виході з ладу одного з інверторів. Для підтримки роботи перетворювача за таких умов несправний інвертор шунтується тиристором, як показано на рис. 4.3 пунктирною лінією.

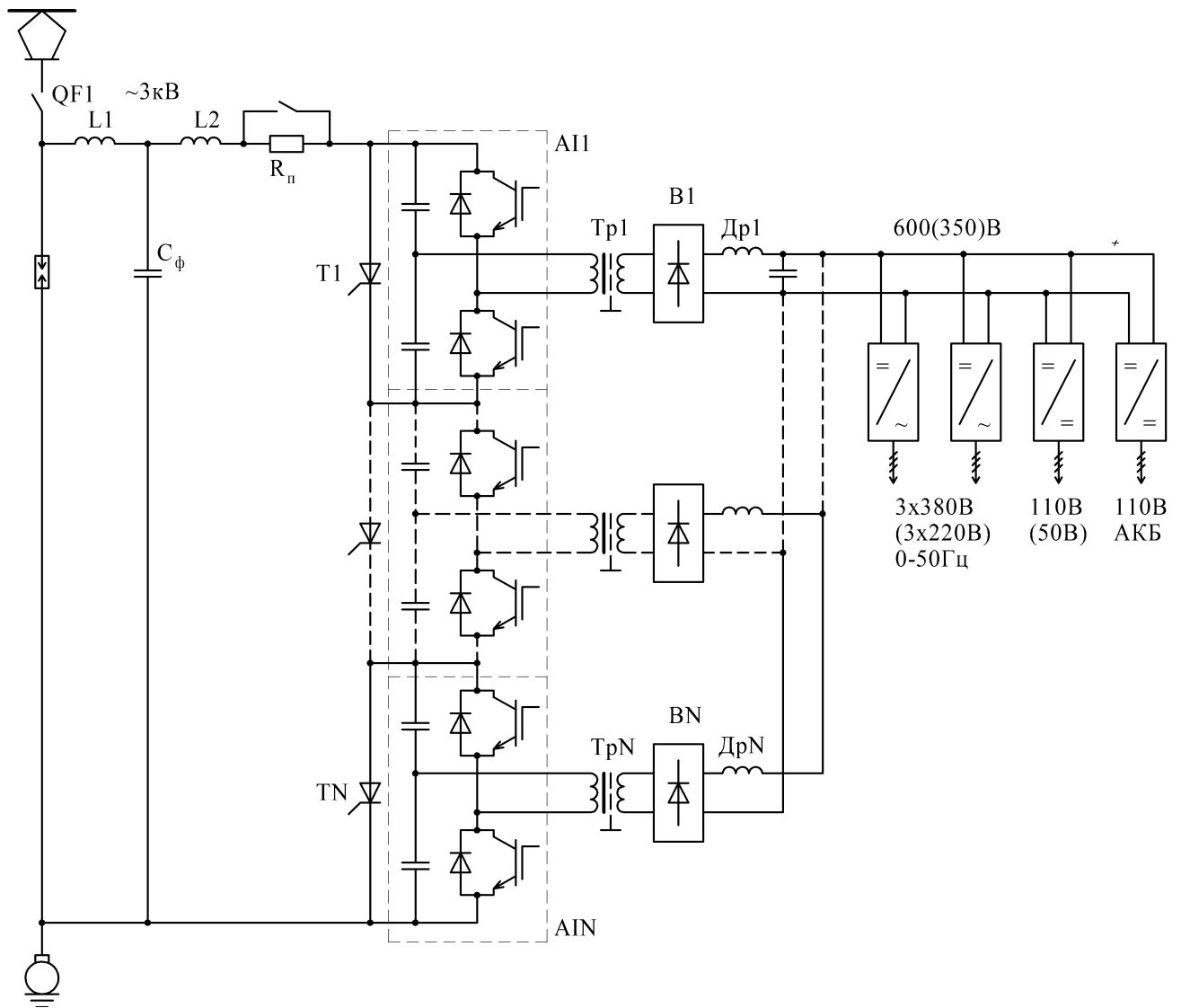


Рисунок 4.3 – Принципова схема каскадного перетворювача власних потреб

При організації шини постійного струму мережі живлення всього електропоїзда достатньо встановити два перетворювачі 3-6 кВ на 340/540 В потужністю 200 кВт. Для зниження маси і вартості доцільним є використання масляного охолодження, з одночасним забезпеченням контролю стану масла для підвищення надійності [28, 70].

Реалізація живлення споживачів вагонів (кондиціонери, вентилятори, освітлення тощо) відбувається інверторами від загальної ланки 600(350) В, що працюють з постійною частотою 50(60) Гц. Живлення компресора секції відбувається від окремого інвертора з частотним пуском АД компресора.

Живлення мережі постійного струму 110 В і зарядка АКБ забезпечується окремим перетворювачем DC/DC.

Зазначимо, що обладнання низьковольтних споживачів може бути уніфіковане з електропоїздами змінного струму, де в поточний час при модернізації використовуються багатоканальні напівпровідникові перетворювачі МПЧ-02ТП та МПЧ-02ПП потужністю 30 кВт, що замінюють електромашинні фазорозщеплювачі.

Розглянемо алгоритми керування перетворювачем власних потреб.

Особливістю роботи перетворювача власних потреб є його функціонування при значних коливаннях напруги в тяговій мережі в межах 2000÷4200 В за номінальної напруги 3000 В [71, 72]. Бортові споживачі потребують стабілізованої напруги.

Стабілізація напруга можлива за допомогою таких методів:

- на високій стороні – шляхом ШІМ-регулювання інверторів;
- на низькій стороні – за допомогою AC/DC або DC/DC перетворювачів;
- на високій стороні – шляхом використання DC/DC перетворювача.

Розглянемо переваги та недоліки з кожного з алгоритмів.

При реалізації алгоритму стабілізації напруги навантаження методом ШІМ стабілізація напруги навантаження забезпечується одночасним ШІМ регулюванням інверторів. Водночас для забезпечення номінальної напруги навантаження необхідно забезпечити його коефіцієнт трансформації відповідно до мінімальної напруги тягової мережі. Щільність модуляції практично дорівнює одиниці.

При підвищенні напруги до максимальної амплітуда зростає, а щільність модуляції зменшується, що забезпечує стабілізацію середнього значення напруги випрямлячів $V_1 \div V_N$. Пульсації випрямленої напруги згладжуються дроселями $D_{r1} \div D_{rN}$. Для зменшення пульсації використовують фазований зсув напруги інверторів. Для всіх алгоритмів керування необхідно забезпечити дотримання закону $U/f = \text{const}$, що виключає насичення осердя трансформаторів.

Схема для реалізації цього алгоритму достатньо проста, але має такі недоліки:

– трансформатор та інвертор при зміні вхідної напруги повинні забезпечити постійність потужності навантаження. При зміні напруги зворотно-пропорційно зростає вхідний струм: при зменшенні напруги зростає вхідний струм; при підвищенні напруги струм зменшується, тому встановлена потужність:

$$P_{\text{вст}} = U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}}, \quad (4.6)$$

де $U_{\text{max}}, I_{\text{max}}$ – максимальне значення вхідної напруги та струму на межах зміни вхідної напруги.

При реальній зміні напруги тягової мережі 2000÷4200 В встановлена потужність трансформаторів зростає у 3,15 раза;

– номінальний струм модулів, розрахований раніше на напругу 3000 В, зростає при мінімальній вхідній напрузі в 1,5 раза, що призводить до зростання вхідного струму перетворювача до 30 А, що потребує вибору IGBT модулів на струм 90÷100 А залежно від умов охолодження. Стабільність напруги на навантаженні залежить від коефіцієнта жорсткості зовнішньої характеристики трансформатора і випрямляча ($B1 \div BN$);

– зміна щільності роботи ключів інвертора спричиняє збільшення пульсації вхідного струму, і відповідно збільшення встановленої потужності вхідного фільтра.

При розрахунку трансформатора суттєве значення має вибір робочої частоти інвертора. При постійній встановленій потужності трансформатор розраховують на максимальну частоту, що забезпечить мінімальну масу трансформатора. Використання закону $U/f = \text{const}$ дозволяє суттєво знизити втрати в сталі та в інверторі – пропорційно частоті при зменшенні вхідної напруги, що підвищить їх ККД.

При реалізації алгоритму стабілізації вихідної напруги за допомогою АС/DC або DC/DC вхідні інвертори працюють при 180° провідності. Стабілізація напруги відбувається активними випрямлячами (АС/DC) або DC/DC, що працюють у режимі підвищувача напруги. Стабільність напруги в такому разі не залежить від зовнішньої характеристики трансформатора та випрямлячів.

Наявність вихідних стабілізаторів дозволяє забезпечити рівномірність споживання струму інвертора з мережі за рахунок зниження пульсації вхідного струму.

До недоліків схеми слід віднести:

- завищену встановлену потужність трансформатора та ключів інвертора;
- ускладнену схему за рахунок включення додаткових низьковольтних перетворювачів АС/DC (DC/DC);
- збільшені втрати потужності в додаткових перетворювачах.

Реалізація алгоритму стабілізації вхідної напруги перетворювачем DC/DC показана на схемі (рис. 4.4) одного каскаду перетворювача (рис. 4.3).

До входу схеми інвертора підключено перетворювач DC/DC підвищуючого типу (бустер), а ключ К1 працює в режимі ШІР, що забезпечує підвищення напруги від мінімальної до розрахункової, яка вибирається близькою до максимальної. Наявність діода Д1 запобігає розряду конденсаторів інвертора при ввімкненні ключа К1. При вимкненні ключа К1 електромагнітна енергія дроселя L2 перетворюється в електричну енергію конденсатора.

За такого алгоритму інвертор та трансформатор працює з постійною частотою, зменшеним навантаженнями за струмом при коливанні напруги тягової мережі. Це дозволяє оптимізувати параметри трансформаторів за масою, встановлена потужність яких дорівнює номінальному режиму, а саме утричі менше ніж при розглянутих раніше алгоритмах.

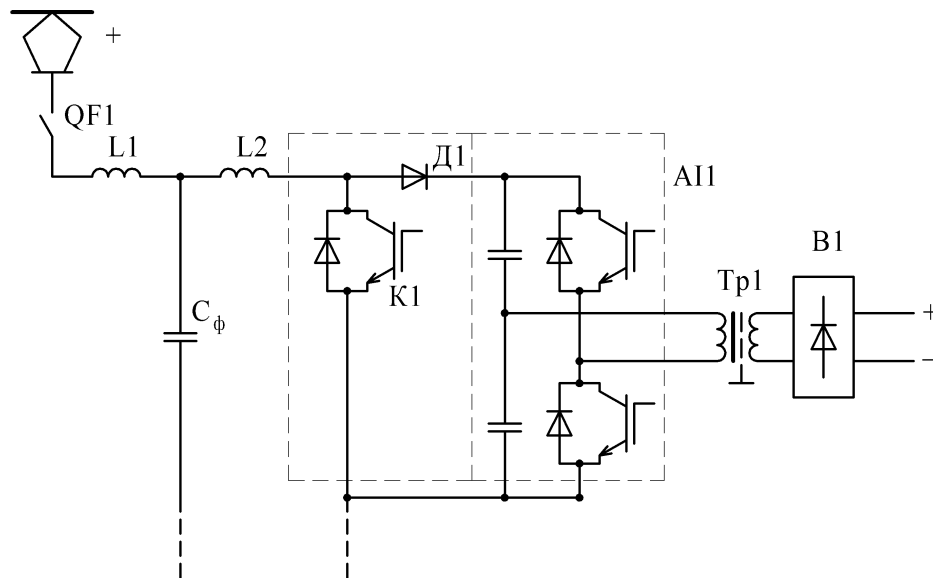


Рисунок 4.4 – Схема каскаду зі стабілізацією вхідної напруги

Наявність ключа дозволяє шунтувати аварійний інвертор, подібно тиристорі в схемі на рис. 4.3, і відповідно забезпечувати роботу перетворювача при виході з ладу одного з інверторів або шунтуючого ключа.

Додаткові витрати на допоміжний DC/DC перетворювач практично не впливають на співвідношення собівартості до експлуатаційних витрат за рахунок суттєвого зниження вартості трансформатора та інвертора.

Вищезазначене дозволяє рекомендувати схему (рис. 4.4) перетворювача для живлення власних потреб електропоїзда.

4.5 Дослідження теплових режимів роботи силового модуля імпульсного регулятора напруги

У різних інструкціях розробниками силової напівпровідникової апаратури зазначається, що головним обмеженням при використанні силових напівпровідникових приладів є температура. Джерелом тепла в напівпровідниковому пристрої є так званий кристал – елемент конструкції, через який протікає струм і в якому розсіюється електрична енергія; ця енергія перетворюється в тепло і визначає тепловий режим пристрою. Тому, що вища

робоча температура кристалів та сильніші коливання температури, то нижча надійність роботи силового напівпровідникового пристрою. Таким чином, одним з найважливіших завдань при розробці та моделюванні перетворювальної техніки з використанням силових напівпровідникових пристроїв є тепловий розрахунок.

Досить точний опис методики спрощеного теплового розрахунку модуля, який працює в режимі «жорсткого» перемикання (комутуються максимально допустимі робочі значення струму і напруги), наведено в [66]. Але ця методика не дає можливості оцінити перепади температури кристала в перехідних режимах роботи імпульсного перетворювача, що характеризують швидкість теплової втоми модуля, а це суттєво впливає на довготривалу надійність його роботи [73, 74].

Дослідження зміни температури структури здійснено в імпульсному перетворювачі, схема якого наведена на рис. 4.5.

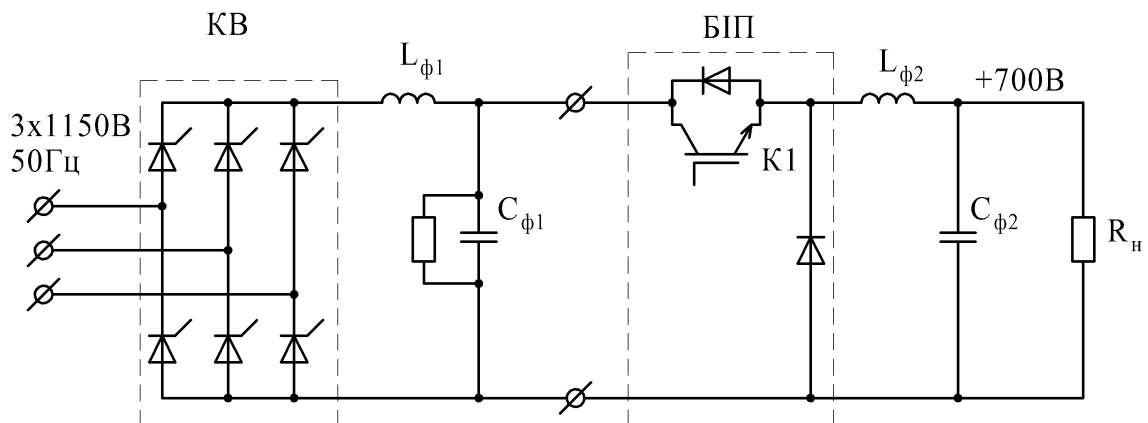


Рисунок 4.5 – Схема стенда для випробування блоку імпульсного перетворювача

Живлення стенда здійснюється від трансформатора з вихідною лінійною напругою 1150 В. Як випрямляч використовується керований випрямляч КВ, який побудовано на тиристорах, система керування якого дозволяє змінювати випрямлену напругу від 0 до U_{\max} . У сталому режимі кут керування КВ сягає 0, що дозволяє мати випрямлену напругу 1500 В у режимі неробочого ходу. Для згладжування пульсацій випрямленого струму і напруги використовується LC-

фільтр, який складається з елементів $L_{\phi 1}$ та $C_{\phi 1}$. Як імпульсний регулятор використовується блок імпульсного перетворювача (БІП), а також дросель $L_{\phi 2}$ і конденсатор $C_{\phi 2}$ із перетворювача власних потреб дизель-потягу ДЕЛ-02, оснащеного регулятором стабілізації вихідної напруги.

Пуск схеми здійснюється шляхом плавного зростання напруги на керованому випрямлячі КВ. Навантаження БІП імітується резистором R_n , еквівалентна потужність навантаження 80 кВт при напрузі 650 В.

Комп'ютерна модель стенда з імпульсним перетворювачем зображена на рис. 4.6 [75], де:

БНВ – блок некерованого випрямляча;

U – джерело постійної напруги;

Diode, R1-C1 – технологічний діод із захисним RC-ланцюжком для запобігання протіканню зворотного струму;

R2-L1 – внутрішній опір джерела постійної напруги;

R3-L2-C2 – конденсатор фільтра постійного струму випрямляча з конструктивною індуктивністю та опором;

R4-R5 – розрядні резистори;

L3 – індуктивність монтажного проводу від випрямляча до стабілізатора;

R6-L4-C3 – вхідний конденсатор стабілізатора з параметрами конструктивної індуктивності і опором;

C4 – малоіндуктивний конденсатор розв'язки;

L22, L5 – індуктивності монтажних проводів;

T1 – силовий транзистор стабілізатора (БІП);

R7, L6, L101-C7, R8-L7, C6, C5, Diode3 – захисні кола транзистора з урахуванням індуктивних параметрів складових елементів;

V1 – зворотний діод для скидання енергії з індуктивності стабілізатора;

Linear transformer – трансформатор зниження швидкості струму через зворотний діод V1;

R103 – навантажувальний опір трансформатора;

C100 – ємність уповільнення переходу струму з транзистора T1 на діод V1;

R10-L10-C8 – накопичувальна ємність стабілізатора з параметрами внутрішньої та монтажної індуктивності та опору;

R11-L11-C9 – ємність з параметрами конструктивних значень L і R для високочастотного розділення накопичувальної ємності;

H – навантаження стабілізатора напруги;

БВТ – блок обчислення температур.

Блок обчислення температур – структура, створена для отримання діючих температурних показників силового модуля, зазначених вище. Його робота базується на розрахунку теплової моделі системи «напівпровідниковий прилад – навколишнє середовище» в реальних параметрах [76]. Структурну схему БВТ [77] наведено на рис. 4.7.

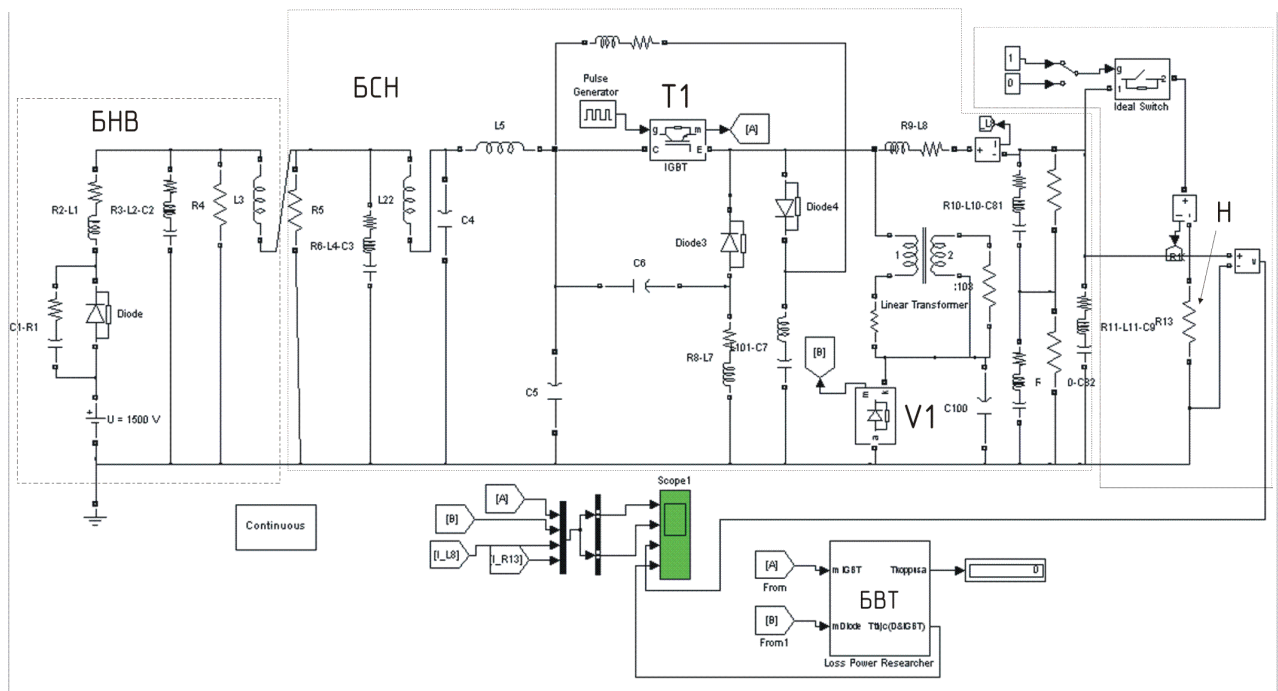


Рисунок 4.6 – Модель стенда випробування блоку імпульсного перетворювача (БП)

Стабілізатор працює таким чином. Від джерела постійної напруги імпульсами, сформованими транзистором T1, енергія надходить на накопичувальну ємність C8, заряджаючи її до необхідного рівня напруги. Струм

заряду ємності C8 протікає через індуктивність L8. Після завершення імпульсу струму, що формується T1, збережена в L8 енергія замикається через зворотний діод V1, тим самим додаючи енергію до накопичувальної ємності C8. Тривалість імпульсів, які формуються у T1, визначається навантаженням та рівнем первинної напруги джерела постійної напруги U. Що більше навантаження – то ширше імпульс, що вище напруга – то вужче імпульс.

У системі керування цього стабілізатора застосовується пристрій обмеження струму, який не допускає роботу силового модуля з перевантаженнями. Однак у разі виходу з ладу цього пристрою, наприклад, через порушення коректної роботи елементів схеми керування або зворотного зв'язку, виникнення аварійних режимів у силовому модулі стає неминучим. За допомогою розробленої моделі досліджено режим пуску перетворювача у випадку порушення зворотного зв'язку за напругою. Вимкнення аварійного струму відбувається сигналом давача аварійного струму.

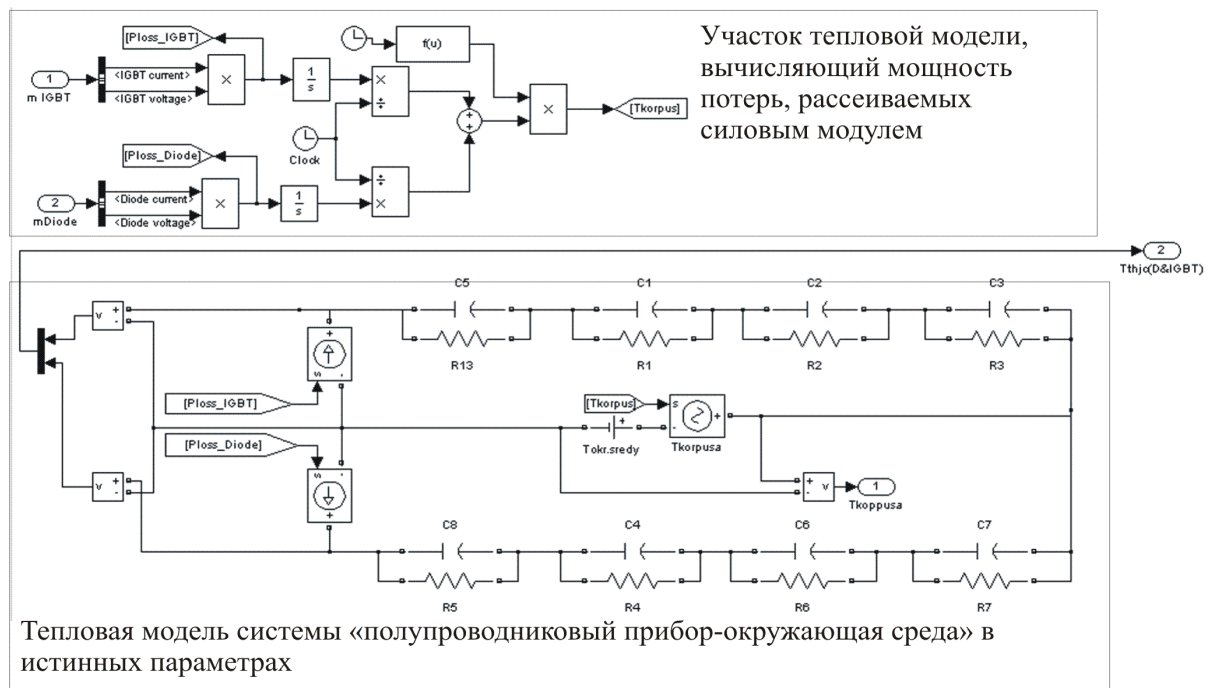


Рисунок 4.7 – Структурна схема блоку обчислення температур

Результати моделювання наведені на рис. 4.8 – рис. 4.10.

Осцилограма напруги навантаження знята на експериментальному стенді. Експериментальна крива напруги навантаження достатньо збігається з комп'ютерною осцилограмою.

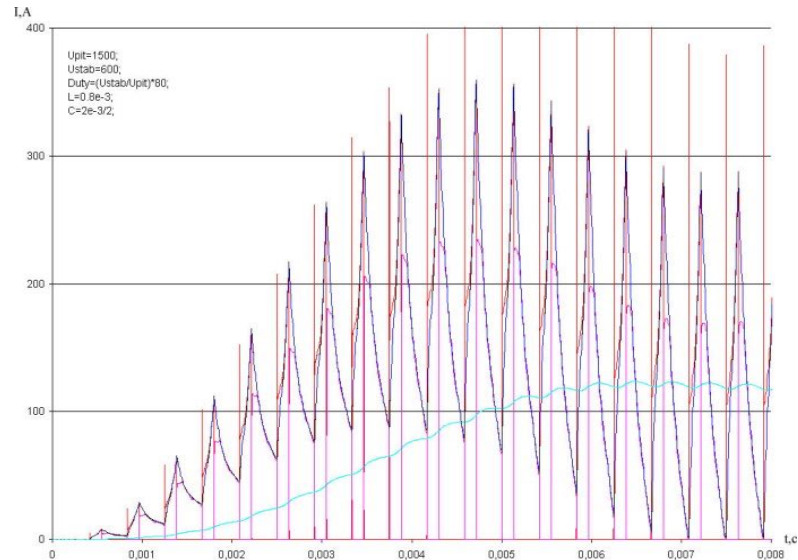


Рисунок 4.8 – Криві струмів IGBT-транзистора (1), діода зворотного струму (2), згладжуючого реактора (3), навантаження (4)

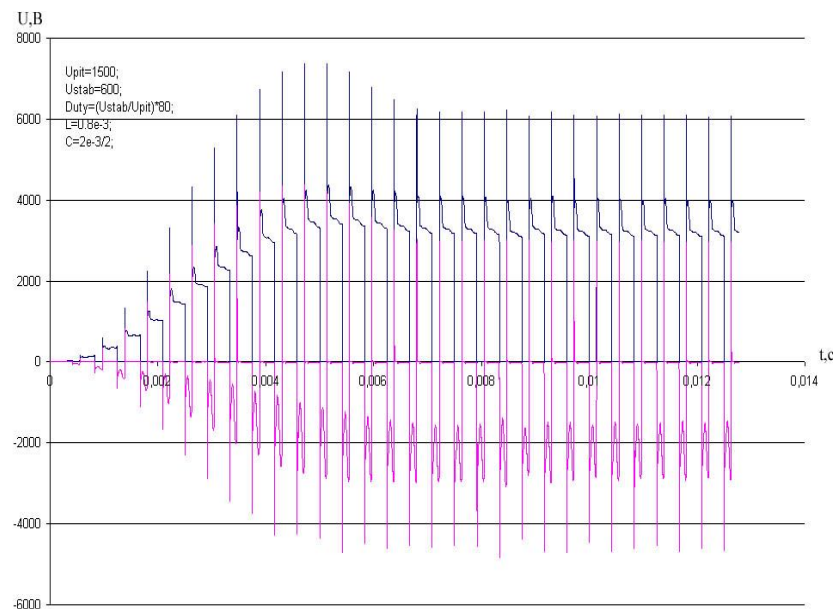


Рисунок 4.9 – Криві напруг IGBT-транзистора (1), діода зворотного струму (2), згладжуючого реактора (3)

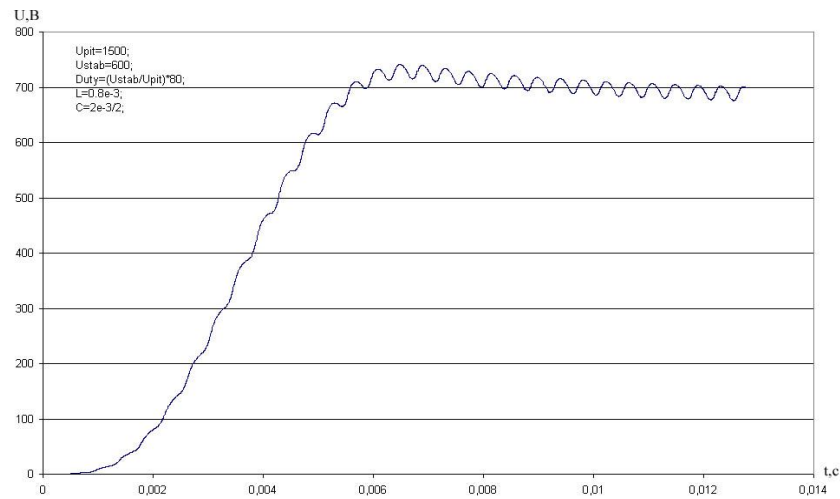


Рисунок 4.10 – Крива напруги навантаження

Для охолодження силового модуля БП використано радіатор типу ВЕРТ-05 (рис. 4.11), розроблений ВАТ «Запорізький електроапаратний завод» як імпортозаміщений радіатор російського виробництва. Використання вказаного радіатора дозволяє зменшити собівартість за рахунок відносно простої технології. Радіатор має 17-реберну структуру металу та його динамічні теплові характеристики вимагали уточнення. Для цього було проведено окреме дослідження на основі методик, викладених у [63, 66, 76, 77, 78, 79, 75, 81, 81, 82, 83].

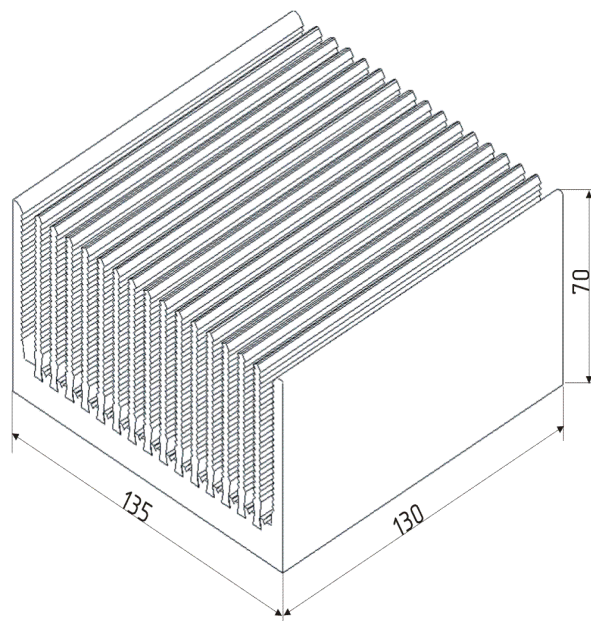


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд досліджуваного радіатора марки ВЕРТ-05

Визначено такі параметри, як коефіцієнт тепловіддачі, ефективність охолоджувача з урахуванням кількості ребер n , а також площу повної поверхні теплообміну. Радіатор розглядався як комбінація окремих елементів – основи та ребер. Після визначення теплового опору було побудовано його залежність від часу підведення потужності втрат для $\omega=0, 3, 6, 9$ м/с. На основі розглянутих методик було розроблено методику теплового розрахунку та комп'ютерну модель блоку обчислень температур (рис. 4.7) для ребристого радіатора при конвекторному теплообміні.

Зазначена модель створена з використанням безперервних блоків пакету MATLAB, що потребує високих обчислювальних потужностей та займає тривалий час. Тому для підвищення швидкості моделювання необхідна дискретизація існуючої моделі.

Результати розрахунку теплового опору структури радіатора наведені на рис. 4.12.

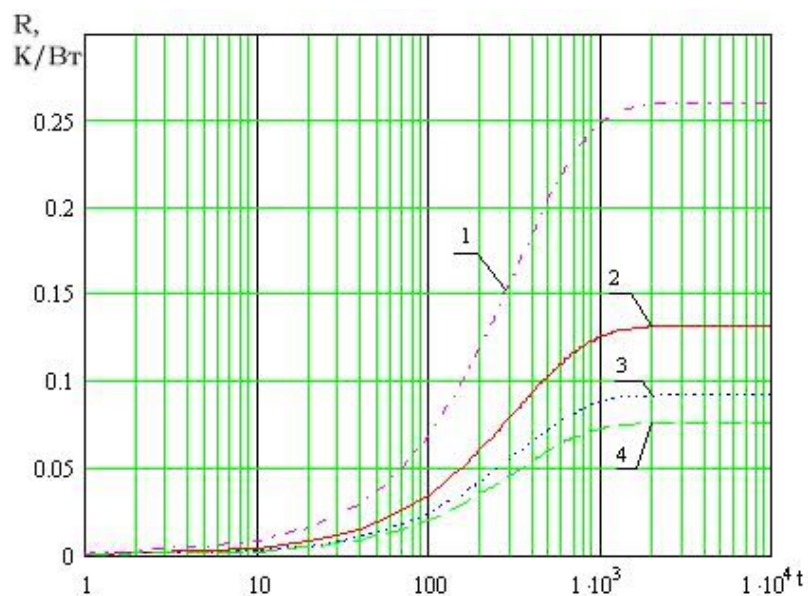


Рисунок 4.12 – Тепловий опір радіатора ВЕРТ-05 $R_T=f(t)$ для різних швидкостей руху охолоджуючого повітря:

1 – 0 м/с, 2 – 3 м/с, 3 – 6 м/с, 4 – 9 м/с

На основі цього дослідження можна зробити такі висновки.

Оптимальним є діапазон швидкості потоку охолоджуючого повітря від 6 до 9 м/с, оскільки подальше збільшення швидкості дає лише незначне зниження теплового опору і є недоцільним.

Отримано параметри, необхідні для БВТ, як-от перехідний тепловий імпеданс залежно від лінійної довжини радіатора і швидкості потоку охолоджуючого повітря від 0 до 9 м/с.

Використовуючи зазначені вище параметри для теплової схеми заміщення, було визначено дійсні значення температури кристала силового модуля стабілізатора напруги (рис. 4.13).

Як видно, максимальне перевищення температури кристала не перевищує 63°C , що за температури довкілля $t_{\text{д}}=45^{\circ}\text{C}$ становить 108°C , що нижче граничної температури кристала, яка дорівнює 150°C . Розмах пульсацій температури кристала не перевищує 32°C у періодичному процесі та $\approx 16^{\circ}\text{C}$ у сталому режимі.

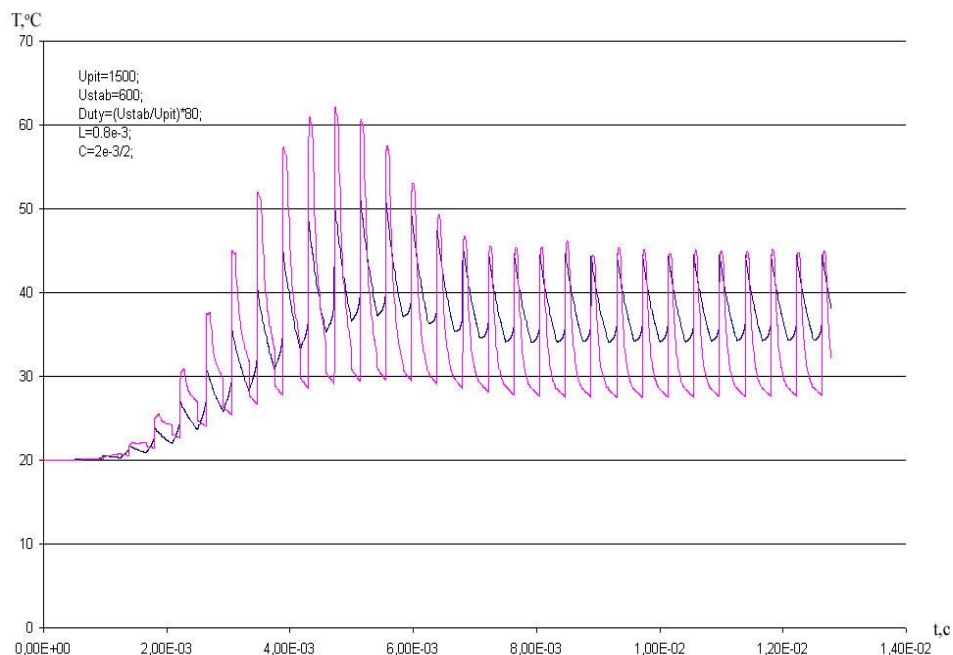


Рисунок 4.13 – Температура структури силового транзистора T1 і діода зворотного струму V1

Заміряна температура корпусу модуля в експериментальному зразку при $t_{\text{д}}=45^{\circ}\text{C}$ становить 65°C , що підтверджується достатньою точністю моделювання.

4.6 Висновки до розділу 4

Проаналізовано перспективні схеми побудови тягової передачі змінного струму з асинхронним двигуном для тягових мереж напругою 3-6 кВ.

Показано, що номінальні значення ККД двигунів у сталому режимі руху, з урахування модернізації їх обмоток, практично однакові й становлять 94-95%.

Порівняльний аналіз засвідчив, що інтегральний ККД асинхронного тягового привода є меншим порівняно з приводом на базі ДПЗ приблизно на 3-5%.

Встановлено, що в обох випадках кількість та потужність напівпровідникових модулів практично однакова, що зумовлює зіставну їх собівартість.

З огляду на стан економіки України, у найближчій перспективі доцільним є впровадження модернізованої схеми тягової передачі, зважаючи на наявність моторного візка та ДПЗ, що забезпечує рівний або навіть дещо вищий інтегральний ККД тягової передачі, особливо у сфері міських пасажирських перевезень.

Економічна ефективність модернізації визначається співвідношенням витрат на розробку та виробництво перетворювача з витратами на обслуговування колектора ДПЗ та економією електроенергії модернізованого ДПЗ.

Тяговий привод з АД доцільно використовувати при побудові нових швидкісних електропоїздів ($V \geq 120$ км/год), для яких важливо зменшення маси АД.

Економічність побудови передачі з АД визначається співвідношенням вартості розробки та виготовлення нового двигуна, перетворювача, моторного візка до експлуатаційних витрат. Водночас необхідно врахувати економічний ефект від збільшення швидкості руху за рахунок зменшення маси двигуна.

Удосконалено методику оптимального вибору напівпровідникових приладів з урахуванням коефіцієнтів теплового режиму та повних втрат потужності при частотах до 2000 Гц.

Проаналізовано перспективні схеми та алгоритми побудови перетворювачів живлення власних потреб електропоїзда та надані рекомендації щодо їх схемної реалізації.

Розроблено комп'ютерну модель для дослідження теплових режимів роботи модуля у складі «модуль–охолоджувач» у імпульсному перетворювачі.

Результати досліджень щодо вибору типу охолоджувача були прийняті до впровадження ТОВ «НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) під час розробки перетворювача для живлення власних потреб типу МПЧ-П2ТП-УЗ для дизель-поїзда ДЕЛ-02.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна задача, пов'язана з підвищенням ефективності тягової електропередачі електропоїздів постійного струму, що полягає в розробці схеми та алгоритмів імпульсного керування двигунами постійного струму з послідовним збудженням, яка без допоміжних джерел живлення дозволяє отримати динамічні та статичні характеристики, аналогічні двигунам з незалежним збудженням, та призводить до збільшення пускового моменту, зменшення собівартості перетворювача для тягової електропередачі.

1. Аналіз технічної літератури та сучасного стану тягових електропередач електропоїздів постійного струму показав, що використання сучасних напівпровідникових приладів дозволяє суттєво покращити статичні та динамічні характеристики, енергетичні показники та показники надійності електричного рухомого складу, тому питання з покращення вартісних та енергетичних показників тягової електропередачі поїздів є актуальними.

2. На сьогодні електропоїзди, що експлуатуються в Україні, мають значний знос (до 90%) та застарілі технічні рішення тягової електропередачі, що призводить до значних енергетичних та експлуатаційних втрат. З урахуванням економічного стану проблема підвищення надійності та енергоефективності вирішується шляхом часткової модернізації під час капітальних ремонтів рухомого складу та впровадженням в експлуатацію нових електропоїздів з сучасними рішеннями щодо тягової електропередачі та систем живлення власних потреб.

3. Розроблені математичні моделі та алгоритми управління модернізованої схеми. Показано, що реалізація вискоефективних режимів роботи досягається безконтактною зміною структури силових кіл на періоді модуляції струмів якоря або збудження, виявлені особливості струмового навантаження допоміжних діодів.

4. Розроблені імітаційні моделі, які дозволяють досліджувати електромеханічні процеси в модернізованій схемі імпульсного керування двигуном послідовного збудження, що дозволило в результаті порівняльного аналізу існуючих схем та модернізованої схеми показати перевагу останньої у збільшенні тягового моменту на 5-7% залежно від стану магнітної системи, що підтверджено експериментальними дослідженнями.

5. Встановлено, що модернізована схема імпульсного регулювання, на відміну від наявних, дозволяє проводити динамічне гальмування з номінальним моментом на валу тягового двигуна за швидкості обертання якоря до 8% від номінальної.

6. Розроблено та досліджено на комп'ютерній моделі схему захисту від буксування та отримано нові залежності параметрів двигунів від коефіцієнта зчеплення коліс з рейками. Показано, що схема має високу швидкодію, яка сягає 4-20 періодів модуляції при різниці швидкості обертання двигунів 0,06% від номінальної.

7. Проведено аналіз перспективних схем побудови тягової передачі змінного струму для тягових мереж 3-6 кВ, та надані рекомендації щодо їх реалізації.

8. Показано можливості підвищення ККД тягових асинхронних двигунів та двигунів постійного струму завдяки модернізації шестифазних та несиметричних обмоток збудження відповідно. Аналіз показує, що номінальний ККД обох двигунів може бути практично однаковим (94-95%). Зважаючи на сказане, показано, що інтегральний ККД у режимах руху, характерного для приміських електропоїздів у передачах з двигуном послідовного збудження приблизно на 3-5% вищий, ніж у приводах з асинхронним двигуном при частотному регулюванні.

9. Враховуючи, що кількість та встановлена потужність напівпровідникових приладів для передачі змінного та постійного струму практично однакова, то ефективність впровадження модернізованої схеми (з урахуванням модернізації двигунів) визначається співвідношенням витрат на

експлуатацію колекторів ДПЗ та економії електроенергії з урахуванням інтегрального ККД [54, 57, 61] передачі постійного струму.

10. Враховуючи економічний стан України, тягова передача з модернізованою схемою та двигуном постійного струму може бути рекомендована для модернізації приміських електропоїздів постійного струму при швидкості руху до 120 км/год. Тяговий привод з асинхронним двигуном з урахуванням необхідності розробки (модернізації) нового моторного візка рекомендується для побудови електропоїздів швидкісного руху більш як 120 км/год та при живленні від мереж у діапазоні напруг 3-6 кВ.

11. Удосконалено методику порівняльного вибору напівпровідникових приладів з урахуванням їх реальних режимів експлуатації у схемах тягових електропередач та перетворювачах власних потреб.

12. Проаналізовані перспективні схеми, алгоритми роботи та надані рекомендації з побудови схем перетворювачів власних потреб. Розроблено імітаційну модель для дослідження теплових режимів з урахуванням реальних профілів охолодження напівпровідникових приладів та проведено аналіз теплових режимів і перевірку результатів на реальному зразку перетворювача типу НПЧ-П2ТП на стендах ТОВ НДІ «Перетворювач».

13. Розроблену модернізовану схему та рекомендації роботи впроваджено у ТОВ «НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) під час реалізації проєктів модернізації електровозів ЧМ1, електроприводів переміщення 60-тонного мостового крану Алчевського меткомбінату та перетворювача живлення власних потреб типу МПЧ-П2ТП-УЗ для дизель-потягу ДЕЛ-02, а також використано в освітньому процесі Національного університету «Запорізька політехніка» при підготовці фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Таким чином, досягнуто поставлену мету, а саме розроблено енергоефективну модернізовану схему електропередачі з двигуном постійного струму послідовного збудження із формуванням динамічних та статичних характеристик, аналогічних двигунам незалежного збудження без використання

допоміжних джерел живлення, що покращує їх вартісні та моментні характеристики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Вельможко О. Усі потяги, електрички та вагони «Укрзалізниці» [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <https://chas.news/current/usi-potyagi-elektrichki-ta-vagoni-ukrzalznitsi-povnii-rozbir-togo-na-chomu-mi-izdimo>

2 Bodnar B., Ochkasov O., Ochkasov M. Devising a procedure for calculating the technical condition index of locomotive nodes based on monitoring results // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 5, Iss. 3 (113). – P. 37–45. – DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242478.

3 Муха А.М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. В. Лазаряна. – Дніпро, 2011. – 334 с.

4 Bernet S. Recent developments of high power converters for industry and traction applications // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Vol. 15, No. 6. – P. 1102–1117.

5 Басов Г. Г., Яцько С. І. Розвиток електричного мотовагонного рухомого складу. – Харків: Апекс+, 2005. – Ч. 2. – 248 с.

6 Нікітенко А. В., Костін М. О. Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 4 (113). – С. 25–31.

7 Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Задесенець В. І. Обґрунтування критерію ефективності експлуатації локомотивів // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2020. – № 4 (143). – С. 10–14.

8 Гордієнко Т. М. Дослідження відповідності показників надійності швидкісного електропоїзду Екр-1 встановленим технічним вимогам // Залізничний транспорт України. – 2017. – № 2 (123). – С. 64–75.

9 Manson A. J. Railroad Electrification and the Electric Locomotive: Outline of Principles Involved in Railroad Electrification. – Forgotten Books, 2018. – 372 p.

10 Lopes J., Costa P. J., Ferreira J., Tavella P. J. Medium-voltage DC electric railway systems: A review on feeding configurations, power quality and reliability //

IET Electric Power Applications. – 2021. – Vol. 15, Iss. 6. – P. 621–634. – DOI: 10.1049/els2.12054.

11 Stöhr M. Lokomotivsysteme für hochgespannten Gleichstrom // Elektrotechnik & Maschinenbau. – 1940. – Н. 37/38, 39/40.

12 Далека В. Х., Нем В. К., Скуріхін В. І. Електропостачання електричного транспорту: навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2012. – 168 с.

13 Steimel A. Electric Traction: Motive Power and Energy Supply. – Oldenbourg Industrieverlag, 2008. – 408 p.

14 Буряк В. М. Експлуатація електрообладнання систем електропостачання: навч. посібник. – Харків: ХДАМГ, 2001. – 386 с.

15 Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. – 3rd Edition. – John Wiley & Sons, 2003. – 824 p.

16 Pelly B. R. Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters: Operation, Control, and Performance. – Wiley, 1971. – 434 p.

17 Гончаров Ю. П., Панасенко М. В., Семененко О. І., Хворост М. В. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 190 с.

18 Bernet S. Recent developments of high power converters for industry and traction applications // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Vol. 15, No. 6. – P. 1102–1117.

19 Maruyama N. Flywheel Type Electric Railway Energy Saving Substation // Japanese Railway Engineering. – 1981. – Vol. 21, No. 2.

20 Polater N., Tricoli P. Technical review of traction drive systems for light railways // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 9. – Art. 3187. – DOI: 10.3390/en15093187.

21 Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. Побудова схеми тягової електропередачі моторвагонного поїзда з можливістю рекуперації [Електронний ресурс] // EIRZNTU (Electronic Institutional Repository of Zaporizhzhya National Technical University). – Запоріжжя, 2015. – Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/3770>.

22 Gorobchenko O., Fomin O., Fomin V., Kovalenko V. Study of the influence of electric transmission parameters on the efficiency of freight rolling stock of direct current // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 1, Iss. 3 (91). – P. 60–67. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.12171319>.

23 Tugay D. V., Zhemerov G. G. The overhead line voltage stabilization to increase the efficiency of the DC electric rail traction system // *Technical Electrodynamics*. – 2018. – No. 5. – P. 88–91. – DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.088>.

24 Сінчук О. М., [та ін.]. Комбінаторика перетворювачів напруги сучасних тягових електроприводів рудничних електровозів / під ред. О. М. Сінчука ; Інститут електродинаміки НАН України. – Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2006. – 251 с.

25 Сінчук О. М., Гузов Е. С., Дебелий В. Л., Дебелий Л. Л. Шахтний електровозний транспорт. Теорія, конструкції, електрообладнання: підручник. – Кривий Ріг: ЧП Щербатих А. В., 2015. – 428 с.

26 Ronanki D., Singh S. A., Williamson S. S. Comprehensive topological overview of rolling stock architectures and recent trends in electric railway traction systems // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2017. – Vol. 3, No. 3. – P. 724–738. – DOI: [10.1109/TTE.2017.2703583](https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2703583).

27 Барибін М. А., Фалендиш А. П., Гатченко В. О., та ін. Інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки» та математичні методи пошуку основних параметрів руху поїзда як основи оптимізації витрат ресурсів на тягу // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2020. – № 4 (143). – С. 15–27.

28 Василевський В. В., Каплієнко О. О., Шило С. І. Застосування нейронних мереж для прогнозування вологості ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – №3. – С. 8–12. – DOI: [10.20998/2079-3944.2019.2.02](https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.2.02).

29 Borshchev A. The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 8. – AnyLogic North America, 2013. – 616 p.

30 Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Комплексний підхід до моделювання динамічних процесів в системі електричної тяги метрополітену // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 1, Iss. 9 (97). – P. 48–57. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>.

31 Жуйков В. Я., Сучик Є. Є., Андрієнко П. Д., Єременко М. А. Автоматизоване проєктування електронних схем. – К. : Техніка, 1998. – 180 с.

32 Law A. M. Simulation modeling and analysis. – 6th ed. – McGraw Hill, 2024. – 800 p.

33 Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги: монографія: [у 2-х т.]. – Дніпро: Видавництво Маковецький, 2011. – Т. 2. – 364 с.

34 Андрієнко П. Д., Шило С. І. Використання широтно-імпульсного регулювання для покращення характеристик серійних електродвигунів // XIV міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика»: зб. наук. пр. Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 72–74.

35 Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., Шило С. І. Дослідження режимів гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна при низьких частотах обертання // Енергозбереження на залізничному транспорті : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 30 травня – 02 червня 2012 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2012. – 82 с. – С. 3.

36 Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., Шило С. І. Аналітичний опис електромеханічних процесів вдосконаленої схеми імпульсного регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження // Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО–2010» : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Місхор, 27–30 вересня 2010 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2010. – 124 с. – С. 5.

37 Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 51–58.

38 Rabaey J. M., Chandrakasan A., Nikolic B. Digital integrated circuits: a design perspective. – 2nd ed. – Prentice Hall, 2003. – 792 p.

39 Hase K.-R., Müther S., Spiess P. Neue Erkenntnisse zum Verhalten von Gleitschutzsystemen in elektrischen Triebzügen // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2005. – Vol. 54, No. 10. – P. 599–609.

40 Костенко І. О., Петренко О. М. Алгоритм керування DC-DC перетворювачем для пристрою ослаблення поля // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Зб. наук. пр. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 42 (1151). – С. 31–33.

41 Шавьолкін О. О., Герасименко В. А., Кожемякін С. М. Покращення енергетичних показників тягового електропривода трамвая з двигуном постійного струму послідовного збудження // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Зб. наук. пр. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 42 (1151). – С. 80–84.

42 Андрійченко В. П., Закурдай С. О., Костенко І. О. Вдосконалення способу регулювання збудження тягових двигунів постійного струму // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Вип. 67. – С. 31–35.

43 Михаліченко П. Є. Моделювання аварійного режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі електровозів постійного струму // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 73–79.

44 Панченко С. В., Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., та ін. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – Ч. 2. – 204 с.

45 Khalil H. K. Nonlinear systems. – 3rd ed. – Prentice Hall, 2002. – 750 p.

46 Chapman S. J. Electric machinery and power system fundamentals. – McGraw-Hill Education, 2002. – 673 p.

47 Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О., Немудрий І. Ю. Дослідження динаміки серієсного електродвигуна з різними імпульсними схемами регулювання // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 4–8.

48 Коваленко Д. М., Синицький О. С., Янцевич В. С. Шляхи удосконалення контролю ізоляції тягових електричних двигунів // Локомотив-інформ. – 2019. – № 9 (165). – С. 15–17.

49 Флора В. Д. Визначення магнітного потоку та розмаху його пульсацій при імпульсному живленні тягового двигуна постійного струму // Електротехніка та електроенергетика. – 2004. – № 2. – С. 15–20.

50 Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко А. О., Немудрий І. Ю. Дослідження перехідних режимів під час послідовного з'єднання серієсних електродвигунів постійного струму // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – № 1. – С. 10–16.

51 Шило С. І. Швидкодіюча система захисту від боксування двигунів послідовного збудження // Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми ресурсозбереження в промисловості та на транспорті»: матеріали конференції (23–25 жовтня 2024 року, м. Харків). – Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. – 137 с. – С. 57–60.

52 Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О., Шевченко Н. М. Дослідження реостатно-рекуперативного гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 2. – С. 6–9.

53 Шило С. І. Покращення електромеханічних характеристик серієсних електродвигунів засобами силової електроніки // Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11–13 червня 2014 року). – Дніпро: ДНУЗТ, 2014. – 181 с. – С. 161–162.

54 Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Lukoševičius V., Keršys A., Kilikevičius S. Analysis of the efficiency of traction drive control systems of electric locomotives with asynchronous traction motors // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 9. – Article 3689. – DOI: 10.3390/en16093689.

55 Алексахін О. О., Пархоменко Л. О., Панчук О. В., та ін. Інтенсифікація теплообміну у каналах системи охолодження тягових електродвигунів // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2019. – № 1. – С. 3–9.

56 Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: навч. посіб. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.

57 Лущик В. Д. Перспективні напрямки удосконалення електричних машин: монографія. – К.: ПрАТ «Миронівська друкарня», 2015. – 264 с.

58 Кулагін Д. О., Чернецький Б. С. Особливості вибору тягових електродвигунів для побудови систем рухомих електротехнічних комплексів [Електронний ресурс] / Д. О. Кулагін, Б. С. Чернецький // EIRZNTU (Electronic Institutional Repository of Zaporizhzhya National Technical University). – Запоріжжя, 2015. – Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/3841>.

59 Лущик В. Д., Варванський А. Ю. Еволюція удосконалення машин постійного струму та перспективи їх подальшого розвитку // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 5. – С. 29–32.

60 Lushchik V. D. DC electrical machines: with non-salient pole stator and asymmetrical compensating winding / V. D. Lushchik. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 92 p.

61 Безрученко В. М., Варченко В. К., Чумак В. В. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навч. посіб. – Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.

62 *Electro-Motive Diesel Locomotives: List of GM-EMD locomotives, Electro-Motive Diesel, EMD F7, EMD SDP40, EMD GP7, NZR DA class, British Rail Class 66, EMD SD40-2*. – Memphis: Books LLC, Wiki Series, 2010. – 72 p.

63 *Industrial IGBT Modules: Explanation of Technical Information* [Електронний ресурс] / Infineon Technologies. – Infineon Technologies AG, 2020. –

30 р. – Режим доступу: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN2011_05_IGBT_Modules_Explanation-ApplicationNotes-v01_02-EN.pdf

64 Nishiyama T. The IGBT Module with 6th Generation IGBT chip / T. Nishiyama // Power Electronics. – 2009. – Vol. 43, No. 9. – P. 5–7.

65 IGBT Modules Application Note [Електронний ресурс] / Mitsubishi Electric. – Mitsubishi Electric Corporation, 2014. – 50 р. – Режим доступу: https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/powerdevices/application_notes/igbt_note_e.pdf.

66 Takahashi T., Yoshiura Y. The 6th-Generation IGBT & Thin Wafer Diode for New Power Modules / T. Takahashi, Y. Yoshiura // Power Device, Mitsubishi Electric ADVANCE. – 2011. – June. – P. 5–7.

67 Петренко О. М. Експериментальне дослідження нагріву частотно-керованого асинхронного двигуна при різних джерелах живлення // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 21–23.

68 Андрієнко Д. С., Шило С. І. Оцінка доцільності використання напівпровідникових перетворювачів для живлення власних потреб електропоїздів постійного струму // Економічний аналіз. – 2024. – Т. 34, № 3. – С. 447–453.

69 Korotun A., Moroz H., Titov I., Reva V., Shilo S. Optical properties of the ensembles of the spherical nanoparticles, embedded into the thin-film solar cell // 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2024) : proceedings. – 2024. – ISBN 979-835036817-8. – ISSN 2377-6935. – DOI: 10.1109/ELNANO63394.2024.10756911.

70 Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., Shylo S., Shkarupylo V. (2019). Method of artificial neural network synthesis for using in integrated CAD // 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM 2019) : proceedings. – 2019. – No. 8779248. – P. 24–29. – DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779248.

71 Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., Шило С. І., Немудрий І. Ю. Порівняльний аналіз схемних рішень стабілізованої тягової підстанції постійного

струму // Електрифікація транспорту «Транселектро 2009» : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (Місхор, 03–05 червня 2009 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2009. – 77 с. – С. 26.

72 Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., Шило С. І., Немудрий І. Ю. Імітаційна модель «Тягова підстанція – електрорухомий склад постійного струму» // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті (EMC&S–R) : тези IV Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпропетровськ, 15–19 лютого 2009 року). – Дніпро : ДПТ, 2011. – 98 с. – С. 8–9

73 Murdock D. A., Ramos Torres J. E., Connors J. J., Lorenz R. D. Active thermal control of power electronic modules // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2006. – Vol. 42, No. 2. – P. 552–558. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.863905>.

74 Bakran M., Eckel H. Der Einsatz von IGBT Traktionsstromrichtern in Nah- und Fernverkehrstriebfahrzeugen // Elektrische Bahnen. – 2001. – Vol. 99, Issue 10. – P. 408–414.

75 Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О. Дослідження теплових режимів роботи силового модуля імпульсного стабілізатора напруги // Вісник КДПУ. – 2006. – № 4. – С. 85–88.

76 Munk-Nielsen S., Blaabjerg F. Thermal analysis of insulated gate bipolar transistors (IGBTs) / S. Munk-Nielsen, F. Blaabjerg // Proceedings of the 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '96). – 1996. – Vol. 2. – P. 1290–1296. – DOI: [10.1109/PESC.1996.548667](https://doi.org/10.1109/PESC.1996.548667).

77 Held M., Jacob P., Nicoletti G., Scacco P., Poech M. H. Electrothermal simulation of power electronic systems // Proceedings of the 10th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD '98). – 1998. – P. 139–142. – DOI: [10.1109/ISPSD.1998.695915](https://doi.org/10.1109/ISPSD.1998.695915).

78 Kraus A. D., Aziz A. Extended surface heat transfer. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 1120 p.

79 Remsburg R. Thermal design of electronic equipment. – Boca Raton: CRC Press, 2001. – 400 p.

80 Жорняк Л. Б., Каплієнко О. О., Шило С. І. Застосування теорії розмірностей до опрацювання експериментальних даних під час температурних досліджень електричних апаратів // Електротехніка та електроенергетика. – 2002. – № 1. – С. 41–47.

81 Жорняк Л. Б., Каплієнко О. О., Шило С. І. Програма визначення часових параметрів нагріву комплектних пристроїв під час прискорених теплових випробувань // Електротехніка та електроенергетика. – 2003. – № 2. – С. 51–54.

82 Zwanziger P. A contribution to electro-thermal interaction in power moduls: doctoral thesis. Technical University Berlin, 1992.

83 Srajber D. The calculation on the power dissipation for the IGBT and inverse diode in circuits with sinusoidal output voltage / D. Srajber // Proceeding of Electronica. – 1992. – P. 651–658.

**Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації**

*Статті у міжнародних виданнях та у виданнях, які включено до науково-
метричних баз:*

1. Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., **Shylo S.**, Shkarupylo V. (2019). Method of artificial neural network synthesis for using in integrated CAD // 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM 2019) : proceedings. – 2019. – No. 8779248. – P. 24–29. – DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779248. – (Scopus, Web of Science) (*Особисто здобувачем: розроблено та адаптовано систему тестування модифікованого генетичного алгоритму*).

2. Korotun A., Moroz H., Titov I., Reva V., **Shilo S.** Optical properties of the ensembles of the spherical nanoparticles, embedded into the thin-film solar cell // 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2024) : proceedings. – 2024. – ISBN 979-835036817-8. – ISSN 2377-6935. – DOI: 10.1109/ELNANO63394.2024.10756911. – (Scopus) (*Особисто здобувачем: розроблена методика розрахунку частотних залежностей випромінювальної ефективності, коефіцієнтів поглинання, розсіювання та відбивання*).

Статті у фахових виданнях України:

3. Жорняк Л. Б., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Застосування теорії розмірностей до опрацювання експериментальних даних під час температурних досліджень електричних апаратів // Електротехніка та електроенергетика. – 2002. – № 1. – С. 41–47. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем: запропонована методика застосування системи обробки даних при обробці температурних режимів роботи електричних апаратів*).

4. Жорняк Л. Б., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Програма визначення часових параметрів нагріву комплектних пристроїв під час прискорених теплових випробувань // Електротехніка та електроенергетика. – 2003. – № 2. – С. 51–54. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем:*

розроблено програмне забезпечення визначення параметрів нагрівання при теплових випробуваннях).

5. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко О. О. Дослідження теплових режимів роботи силового модуля імпульсного стабілізатора напруги // Вісник КДПУ. – 2006. – № 4. – С. 85–88. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблена методика моделювання роботи перетворювача в режимі реального часу з врахуванням теплових режимів роботи кристалів силового модуля).*

6. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко О. О., Немудрий І. Ю. Дослідження динаміки серієсного електродвигуна з різними імпульсними схемами регулювання // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 4–8. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: запропонована модернізована схема тягової передачі з ДПЗ, яка відрізняється від класичної включенням допоміжного діоду у сумісне коло якоря та обмотки збудження, та імітаційна модель нової схеми).*

7. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко А. О., Немудрий І. Ю. Дослідження перехідних режимів під час послідовного з'єднання серієсних електродвигунів постійного струму // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – № 1. – С. 10–16. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблена ефективна система керування для режиму буксування колісних пар, яка базується на удосконаленій схемі регулювання струму тягових двигунів).*

8. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко О. О., Шевченко Н. М. Дослідження реостатно-рекуперативного гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 2. – С. 6–9. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблена імітаційна модель, яка дозволяє проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в двигуні постійного струму з послідовним збудженням в режимі динамічного гальмування та визначено вимоги до граничних параметрів роботи елементів схеми).*

9. Андрієнко П. Д., **Шило С. І.**, Каплієнко О. О. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 51–58. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем: розроблені імітаційні моделі, які дозволяють досліджувати електромеханічні процеси в двигуні постійного струму з послідовним збудженням*).

10. Василевський В. В., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Застосування нейронних мереж для прогнозування вологості ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – № 2. – С. 8–12. – DOI: 10.20998/2079-3944.2019.2.02. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar, Crossref та ін.). (*Особисто здобувачем: запропоновано використання методу нейромереж для прогнозування стану вологості ізоляції лінійних (масляних) трансформаторів, що забезпечує його ремонт не за жорстким графіком, а згідно з дійсним станом ізоляції*).

11. Андрієнко Д. С., **Шило С. І.** Оцінка доцільності використання напівпровідникових перетворювачів для живлення власних потреб електропоїздів постійного струму // Економічний аналіз. – 2024. – Т. 34, № 3. – С. 447–453. (*Особисто здобувачем: визначено базові критерії оцінки можливості заміни електромашинних перетворювачів на напівпровідникові; запропоновано використання уніфікованих рішень при модернізації електропоїздів та електропотягів постійного струму*).

Тези і матеріали наукових конференцій:

12. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Дослідження режимів гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна при низьких частотах обертання // Енергозбереження на залізничному транспорті : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 30 травня – 02 червня 2012 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2012. – 82 с. – С. 3. (*Особисто здобувачем: застосована імітаційна модель, яка дозволяє проводити*

дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в двигуні постійного струму з послідовним збудженням в режимі динамічного гальмування при низьких частотах обертання).

13. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., **Шило С. І.**, Немудрий І. Ю. Порівняльний аналіз схемних рішень стабілізованої тягової підстанції постійного струму // Електрифікація транспорту «Транселектро 2009» : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (Місхор, 03–05 червня 2009 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2009. – 77 с. – С. 26. (*Особисто здобувачем: проведено аналіз і порівняння характеристик схемних рішень*).

14. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., **Шило С. І.** Аналітичний опис електромеханічних процесів вдосконаленої схеми імпульсного регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження // Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО–2010» : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Місхор, 27–30 вересня 2010 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2010. – 124 с. – С. 5. (*Особисто здобувачем: розроблено аналітичний опис електромеханічних процесів вдосконаленої схеми імпульсного регулювання*).

15. **Шило С. І.** Покращення електромеханічних характеристик серієсних електродвигунів засобами силової електроніки // Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11–13 червня 2014 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2014. – 181 с. – С. 161–162.

16. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., **Шило С. І.**, Немудрий І. Ю. Імітаційна модель «Тягова підстанція – електрорухомий склад постійного струму» // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті (EMC&S–R) : тези IV Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпропетровськ, 15–19 лютого 2009 року). – Дніпро : ДПТ, 2011. – 98 с. – С. 8–9. (*Особисто здобувачем: проведено моделювання на розробленій моделі*).

17. **Шило С. І.** Швидкодіюча система захисту від боксування двигунів послідовного збудження // Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми ресурсозбереження в промисловості та на транспорті» : матеріали

конференції (23–25 жовтня 2024 року, м. Харків). – Харків : ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. – 137 с. – С. 57–60.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова комісії

Генеральний директор

ТОВ «НДІ «Перетворювач»

Андріанов Ю.О.

**АКТ**

впровадження результатів роботи

Шиля Сергія Івановича

на тему: «Підвищення ефективності тягової передачі електропоїздів постійного струму»

Цим підтверджується, що результати дисертаційної роботи Шиля С.І. були використані ТОВ «НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) при реалізації:

- пропозицій модернізації тягової електропередачі постійного струму електровозу постійного струму ЧМ1;
- проекту модернізації електроприводу переміщення 60-тонного мостового крану Алчевського металургійного комбінату;
- розробки перетворювача живлення власних потреб типу МПЧ-П2ТП-УЗ для дизель-потягу у частині розробки системи охолодження.

Вважаємо також суттєвими та практично цінними наступні результати:

- дослідження нової схеми імпульсного регулювання двигунів постійного струму послідовного збудження;
- дослідження ефективної схеми захисту від боксування та юзу тягової електропередачі;
- аналіз порівняльних характеристик модернізованої схеми тягової передачі з частотно-регульованим електроприводом.

Технічний директор ТОВ «НДІ «Перетворювач»

А. Кришталь

Директор з виробництва ТОВ «НДІ «Перетворювач»

І. Немудрий

Затверджую



Проректор з наукової роботи

Вадим ШАЛОМЄЄВ

(ім'я, прізвище)

2024 р.

М.П.

А К Т

**про впровадження результатів
кандидатської дисертаційної роботи
в освітній процес**

Даним актом стверджується, що результати дисертаційної роботи на тему «Підвищення ефективності тягової передачі електропоїздів постійного струму», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – Електротранспорт; 275 – Транспортні технології, виконаної Шило Сергієм Івановичем, впроваджено у навчальні програми при викладанні дисциплін: «Регулювання та керування електромеханічних систем»; «Основи силової електроніки»; «Силкові електронні пристрої енергоємних виробництв» в частині використання результатів досліджень щодо енергоефективної схеми імпульсного регулювання модернізованого тягового електроприводу постійного струму, реалізації високоефективних режимів роботи схеми за рахунок безконтактної зміни структури силових кіл на періоді модуляції струмів, особливостей струмового навантаження допоміжних діодів в схемі, аналізу перспективних схем побудови тягової передачі змінного струму для тягових мереж 3-6 кВ, використання принципів фізичного та математичного моделювання в дослідженнях.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на кафедрі «Електричні та електронні апарати» при підготовці фахівців освітньо-професійної програми «Обладнання та інформаційні технології енергоємних виробництв / Equipment and information technologies for energy-intensive industries» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти у Національному університеті «Запорізька політехніка».

Декан електротехнічного факультету

(к.т.н. доцент)

Микола АНТОНОВ

Заступник керівника
навчального відділу

(к.т.н. доцент)

Віталій ШИРОКОБОКОВ

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ

Для експериментального дослідження працездатності модернізованої схеми імпульсного регулювання частоти обертання тягового двигуна послідовного збудження (ДПЗ) розроблено спеціалізований випробувальний стенд, загальний вигляд якого наведено на рис. 1. Випробування проводилися на ДПЗ з номінальною потужністю 3,8 кВт та номінальною напругою 220 В.



Рисунок 1 – Фото спеціального стенду імпульсного перетворювача для фізичного моделювання тягової передачі

Через еластичну муфту ДПЗ механічно з'єднано з двигуном постійного струму паралельного збудження, який виконує функцію змінного навантаження або рушія у режимах моделювання динамічного гальмування. Це дозволяє змінювати умови експлуатації дослідного зразка, зокрема реалізувати як тяговий, так і гальмівний режими. Для створення стабільного механічного навантаження додатково використовується електромагнітне гальмо, жорстко змонтоване на

загальному валу, що дає змогу моделювати роботу тягового електропривода у динамічних умовах.

Стенд включає у себе імпульсний перетворювач (рис. 2), розташований на окремій панелі, побудований на IGBT-модулях, що забезпечує можливість випробування різних режимів роботи модернізованої схеми імпульсного регулювання.



Рисунок 2 – Загальний вигляд імпульсного перетворювача випробувального
стенду