

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

БІЛОВУС Дмитро Петрович

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
НА ЕЛЕКТРОВОЗАХ ЗМІННОГО СТРУМУ. // AUTOMATED ELECTRICITY
CONSUMPTION ACCOUNTING SYSTEM FOR AC ELECTRIC
LOCOMOTIVES.

спеціальність: 174 – Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота
здобувача другого (магістерського) рівня освіти

Виконав: студент групи АКІТм–21
Біловус Д. П.

Науковий керівник:
к.т.н., доцент А. І. Сегін

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
" ____ " _____ 2025 р.

Завідувач кафедри СКС
_____ А. І. Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:
зав. кафедри СКС

_____ А. І. Сегін
"04" грудня 2024р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
БІЛОВУСУ Дмитру Петровичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Система автоматизованого обліку витрати електроенергії на
електровозах змінного струму. // Automated electricity consumption accounting
system for AC electric locomotives.

керівник роботи к.т.н., доцент Сегін А. І.

затверджено наказом по університету від « 28 » листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

1 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1 Силова електрична схема однофазного електровоза змінного струму.

2. Існуючі рішення в сфері автоматизованого обліку витрати електроенергії на
електровозах змінного струму.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Розробити методику визначення витрат електричної енергії на основі
вимірювання миттєвих значень струму та напруги;

2 Адаптувати та застосувати алгоритм швидкого перетворення Фур'є для
аналізу гармонійних складових електричного сигналу у часових інтервалах,
кратних періоду живильної напруги;

3. Створити математичну модель підсистеми обліку електроенергії у межах
узагальненої моделі системи «контактна мережа – електровоз»;

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Спрощена силова електрична схема однофазного електровоза змінного струму.

2. Функціональна схема САУ для тягового режиму.

3. Електричні схеми двохпівперіодного випрямлення.

4. Функціональна схема автоматизованої системи обліку електричної енергії на електрорухомому складі.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Сегін А. І.		
2	Сегін А. І.		
3	Сегін А. І.		
4	Сегін А. І.		

7. Дата видачі завдання 2 грудня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Спрощена схема та опис принципу дії електровоза зі змінним струмом	01.01. 2025. – 31.03. 2025р.	виконано
2	Аналіз існуючих систем обліку витрати електроенергії	01.03. 2025р.– 20.05.2025 р.	виконано
3	Системи автоматизованого обліку споживання електричної енергії на електровозах змінного струму	21.05.2025р. – 30.09. 2025 р.	виконано
4	Математична модель системи автоматизованого обліку електричної енергії	01.10.2025р. – 25.11.2025	виконано
5	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	26.11.2025р. – 30.11.2025р.	виконано

Студент

_____ (підпис)

Біловус Д. П.

Керівник роботи

_____ (підпис)

к.т.н., доц. Сегін А. І.

АНОТАЦІЯ

Біловус Д. П. Система автоматизованого обліку витрати електроенергії на електровозах змінного струму.– Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2025.

У кваліфікаційній роботі представлено структуру та роботу елементів електровозів змінного струму. Проведено аналіз існуючих систем обліку споживання електроенергії. Розроблено систему та математичну модель автоматизованого розрахунку споживання електроенергії електровозом змінного струму.

ANNOTATION

Bilovus D. P. Automated accounting system for electricity consumption on alternating current electric locomotives.– Manuscript.

Research for the degree of “Master” in specialty 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics, educational and professional program – Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil. 2024.

The qualification work presents the structure and operation of the elements of AC electric locomotives. The analysis of the existing accounting systems in electric power consumption. The developed system and the mathematical model of the automated calculation of electric power consumption by the electric alternating current.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 СПРОЩЕНА СХЕМА ТА ОПИС ПРИНЦИПУ ДІЇ ЕЛЕКТРОВОЗА ЗІ ЗМІННИМ СТРУМОМ.....	10
1.1 Принцип роботи електровоза змінного струму	10
1.2 Основні відомості про функціонування електровозів змінного струму.....	11
2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	12
2.1 Аналіз сучасних систем обліку споживання електроенергії на електровозах змінного струму.....	19
2 МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ У ПРОГРАМІ ANSYS.....	22
2.1 Вибір методів керування.....	22
2.2 Аналіз існуючих рішень в сфері автоматизованого обліку витрати електроенергії на електровозах змінного струму.....	26
2.3 Аналіз точності та достовірності обліку електричної енергії вимірювальними приладами.....	30
3 СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ЕЛЕКТРОВОЗАХ ЗМІННОГО СТРУМУ	
3.1 Створення принципової електричної схеми електровоза змінного струму з тиристорними перетворювачами.....	35
3.2 Принципова електрична схема системи автоматизованого обліку споживання електроенергії на електровозах змінного струму.....	35

3.3 Віртуальний пристрій для вимірювання споживання та показників якості електричної енергії, яку використовують електровози.....	40
4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	54
4.1 Методологія математичного моделювання електромагнітних процесів	
4.2. Математична модель системи обліку електричної енергії на електровозах змінного струму.....	
4.3 Результати експериментальних досліджень і математичного моделювання за показниками споживання електричної енергії електровозом.....	
ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68
ДОДАТКИ	68

ВСТУП

Корінне вдосконалення системи управління енергетичним комплексом галузі на основі сучасних автоматизованих технологій обліку та моніторингу споживання енергоресурсів є одним із стратегічних напрямів діяльності ПрАТ «Укрзалізниця» [1]. Електровоз змінного струму являє собою локомотив, у конструкції якого поєднано електричне та механічне обладнання, призначене для забезпечення руху поїздів залізничними магістралями [2-7].

Сьогодні ведуться розробки систем контролю витрат електричної енергії, що не потребують участі локомотивної бригади [8-9]. Одним із таких рішень є система, у якій інформація про споживання електроенергії фіксується не у звичайному лічильнику, а в пам'яті мікропроцесорної системи управління рухом поїзда (МСУР). Для цього за допомогою спеціальних датчиків відстежуються параметри струму та напруги, що надходять до електровоза, на основі яких обчислюється фактичний обсяг енергоспоживання на тягу. Отримані дані зберігаються у МСУР і можуть передаватися до відповідної групи обліку локомотивного депо, за яким закріплено цей електровоз [10-13].

У системі керування електровозом застосовуються прилади на пульті машиніста, що відображають значення ключових параметрів [8]. Особливо важливим є достовірне визначення витрат електроенергії на тягу, які зазвичай контролюються через лічильник, встановлений у кузові локомотива. Оскільки машиніст самостійно знімає показники цього лічильника на початку та в кінці роботи, залишається ймовірність похибок через людський фактор, що може вплинути на точність обліку.

Саме тому коректно організована система обліку електроенергії набуває критичного значення, оскільки процеси її виробництва та споживання відбуваються майже одночасно. Помилка, допущена під час фіксації спожитої

енергії, може бути виправлена лише за допомогою розрахункових методів, що ґрунтуються на непрямому обліку й неминуче містять певну похибку. Це зумовлює потребу у впровадженні автоматизованих систем контролю витрат електроенергії, здатних забезпечити оперативне та достовірне інформування всіх учасників перевізного процесу [10-13].

Для розв'язання зазначеної проблеми необхідно створити вимірювальну схему на електровозі, що дозволить фіксувати параметри напруги та струму в тяговому трансформаторі. Надалі ці дані мають бути перетворені з аналогової форми у цифрову за допомогою аналого-цифрового перетворювача та передані до обчислювального пристрою, де програмні засоби забезпечать визначення фактичних енерговитрат електровоза. Для оцінювання ефективності роботи всієї автоматизованої системи необхідно створити її математичну модель, яка дозволить проводити оптимізацію процесів та підвищувати точність обліку електричної енергії.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення автоматизованої системи обліку споживання електроенергії на електровозах змінного струму, яка забезпечує підвищення точності вимірювань, достовірність аналізу електроенергетичних процесів та можливість отримання реальних даних про енергоспоживання в умовах експлуатації.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

- обґрунтувати принципи побудови автоматизованої системи обліку електроенергії на електровозах;
- розробити методикку визначення витрат електричної енергії на основі вимірювання миттєвих значень струму та напруги;
- адаптувати та застосувати алгоритм швидкого перетворення Фур'є для аналізу гармонійних складових електричного сигналу у часових інтервалах, кратних періоду живильної напруги;
- створити математичну модель підсистеми обліку електроенергії у межах узагальненої моделі системи «контактна мережа – електровоз»;

– розробити алгоритм функціонування підсистеми обліку та оцінити його працездатність;

– провести аналіз точності визначення витрат електроенергії та оцінити рівень спотворення синусоїдальної форми напруги.

Об’єктом дослідження є процес споживання електроенергії електровозами змінного струму в умовах реальної експлуатації.

Предметом дослідження є система автоматизованого автоматизованого вимірювання й обліку електроенергії, а також особливості їх застосування в електрорухомому складі.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи математичного моделювання електротехнічних процесів, інструментальні методи вимірювання миттєвих електричних параметрів, спектральний аналіз сигналів на основі алгоритму швидкого перетворення Фур’є, а також методи системного аналізу та структурного синтезу для побудови алгоритмів функціонування підсистеми обліку.

Наукова новизна полягає у вдосконаленні підходу до визначення витрат електроенергії, який базується на аналізі гармонійних складових напруги та струму у часовому інтервалі, кратному періоду живильної напруги. Запропонована методика дозволяє більш точно оцінювати реальне споживання електроенергії електровозами та визначати рівень спотворення синусоїдальної форми напруги, що підвищує інформативність та достовірність контролю енергетичних процесів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленої автоматизованої системи обліку в реальні умови експлуатації електровозів. Створена математична модель та алгоритм функціонування підсистеми забезпечують підвищення точності визначення споживання електроенергії під час руху поїздів, що дозволяє оптимізувати енергетичні витрати, удосконалити системи технічного обліку та сприяти зниженню експлуатаційних витрат залізничного транспорту.

Апробація.

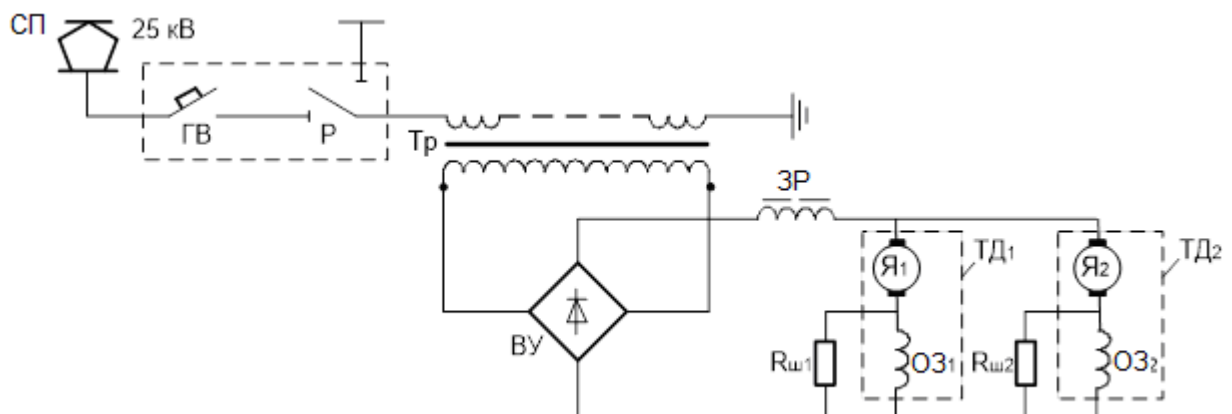
1. Біловус Д. П., Жовток В. В., Рибін А. С. Модель системи обліку електричної енергії на електровозах змінного струму. // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР: СМ –2025). Тернопіль, 2025. С.102 –107.

2. Мукомела Р. В., Жовток В. В., Біловус Д. П. Аватоматизована система керування компресорним агрегатом. // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР: СМ –2025). Тернопіль, 2025. С.78 –86.

1 СПРОЩЕНА СХЕМА ТА ОПИС ПРИНЦИПУ ДІЇ ЕЛЕКТРОВОЗА ЗІ ЗМІННИМ СТРУМОМ

1.1 Принцип роботи електровоза змінного струму

Електровоз, що працює від змінного струму, є тяговим локомотивом, конструкція якого об'єднує електричне та механічне обладнання, призначене для забезпечення руху поїздів залізницею. На рисунку 1.1 наведено спрощений варіант силової електричної схеми електровоза, що живиться від однофазної мережі змінного струму.



СП – струмоприймач; ГВ – головний вимикач; Р – роз'єднувач;

Тр – тяговий трансформатор; ВУ – випрямляюча установка;

ЗР – згладжуючий реактор; Я – якірна обмотка; ОЗ – обмотка збудження; ТД – тяговий електродвигун; Rш – активний шунтуючий резистор.

Рисунок 1.1 – Спрощена силова електрична схема однофазного електровоза змінного струму

Функціонування силової електричної схеми електровоза базується на тому, що однофазна напруга величиною 25 кВ подається від тягової підстанції у контактну мережу, яка включає контактний дріт і рейку. Після проходження через піднятий струмоприймач (СП), головний вимикач (ГВ) та роз'єднувач (Р) електровоза ця напруга надходить на первинну обмотку тягового трансформатора (Тр). На вторинній обмотці трансформатора напруга понижається до приблизно 1200 В, після чого змінний струм подається на випрямляючу установку (ВУ), яка за допомогою вентиляного перетворювача формує постійний струм. Далі через згладжувальний реактор (ЗР) випрямлений струм надходить до тягових двигунів (ТД) пульсуючого постійного струму, у яких якірня (Я) та збуджувальна обмотки (ОЗ) з'єднані послідовно. Реактор ЗР забезпечує зменшення пульсацій струму, а шунтуючий резистор $R_{ш}$, стабілізує магнітний потік у збуджувальній обмотці. Після надходження струму до якоря на валу двигуна утворюється обертовий момент, який за допомогою редуктора передається на колісні пари локомотива. Група тягових двигунів, що може налічувати від чотирьох до дванадцяти і більше одиниць, утворює сумарну тягову силу локомотива, що забезпечує переміщення поїзда по ділянці колії.

1.2 Основні відомості про функціонування електровозів змінного струму

Для забезпечення перетворення змінного струму на постійний в електровозах, що працюють від змінної напруги, використовують випрямлячі, основою яких є електричні вентиля. Під електричним вентилям розуміють пристрій, провідність якого суттєво змінюється залежно від напрямку протікання струму. Вентильний ефект може виникати на межі різних середовищ: металу та електроліту, металу й газу, а також на стику матеріалів

із різними типами провідності, що характерно для напівпровідникових вентилів. Існують керовані і некеровані типи вентилів; у керованих можливість зміни провідності забезпечується впливом керуючого сигналу.

У минулому на електровозах змінного струму використовували ртутні випрямлячі, однак вони мали суттєві вади, серед яких необхідність тривалої підготовки до роботи, складність керування та ризик виникнення зворотного пробую. Згодом їх повністю витіснили напівпровідникові аналоги, які на електровозах серії ВЛ60 встановлювали під час капітальних ремонтів замість ртутних.

У сучасному електрорухомому складі застосовують високопотужні вентилі, конструкція яких базується на кремнієвому випрямляючому елементі завтовшки близько пів міліметра. Для захисту крихкого кремнієвого шару до нього з обох сторін припаюють вольфрамові пластини з близьким коефіцієнтом термічного розширення. Корпус вентиля виконується герметичним, що унеможлиблює потрапляння пилу та вологи до робочих елементів (рисунок 1.2).

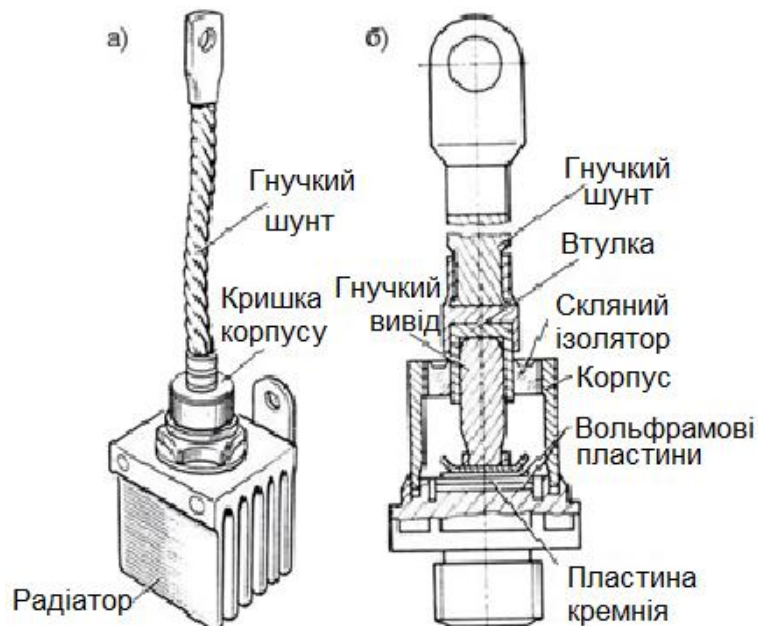


Рисунок 1.2 – Кремнієвий вентиль: (а) – загальний вигляд;
(б) – поперечний розріз

Основною характеристикою напівпровідникових вентилів є їхня вольт-амперна залежність, яка демонструє зміну сили струму в прямому та зворотному напрямках залежно від прикладеної напруги, що показано на рисунку 1.3.

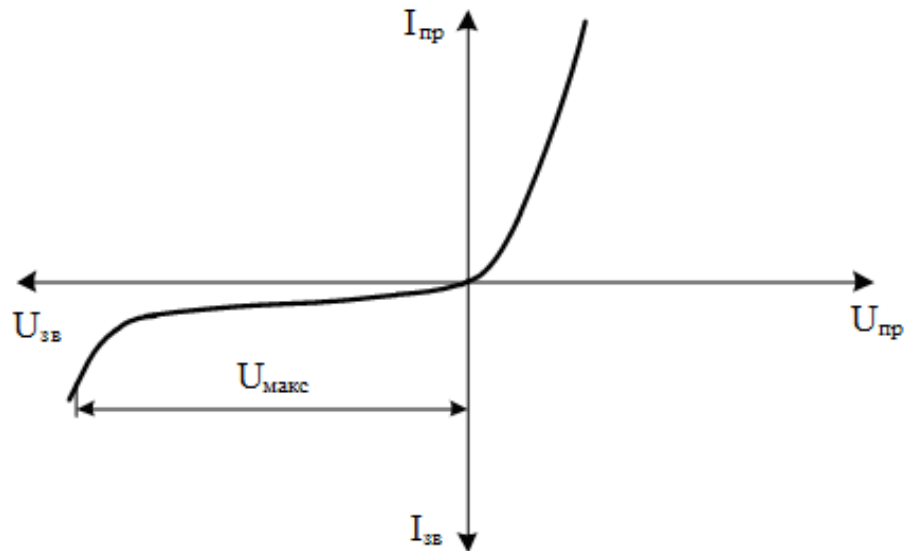


Рисунок 1.3 – Вольт-амперна характеристика кремнієвого вентиля

Під час прямого вмикання вентиля з підвищенням прикладеної напруги $U_{пр}$ струм $I_{пр}$ починає швидко зростати. Якщо ж вентиль під'єднаний у зворотному, непровідному напрямку, струм $I_{зв}$ змінюється повільно, незважаючи на збільшення зворотної напруги $U_{зв}$, що спостерігається у лівій частині графіку. Такий характер зберігається до певного критичного значення напруги, при якому величина струму становить лише соті частки від прямого граничного значення. Коли напруга досягає максимально допустимої межі $U_{макс}$, зворотний струм стрімко збільшується, і відбувається пробій вентиля. З цієї причини пряма та зворотна напруга, що подається на вентиль, не повинна перевищувати встановлене значення $U_{макс}$, яке відповідає моменту пробою.

У системах електровозів вентиляльні перетворювачі виконуються у

вигляді випрямляючих блоків, що призначені для перетворення однофазної змінної напруги на постійну. Таке перетворення здійснюється за рахунок роботи напівпровідникових вентилів, які у визначеному порядку підключення формують випрямляючу установку. Конструктивні параметри таких пристроїв залежать від величини змінної напруги, що підлягає випрямленню, струму навантаження та способу приєднання випрямлювача до вторинної обмотки трансформатора.

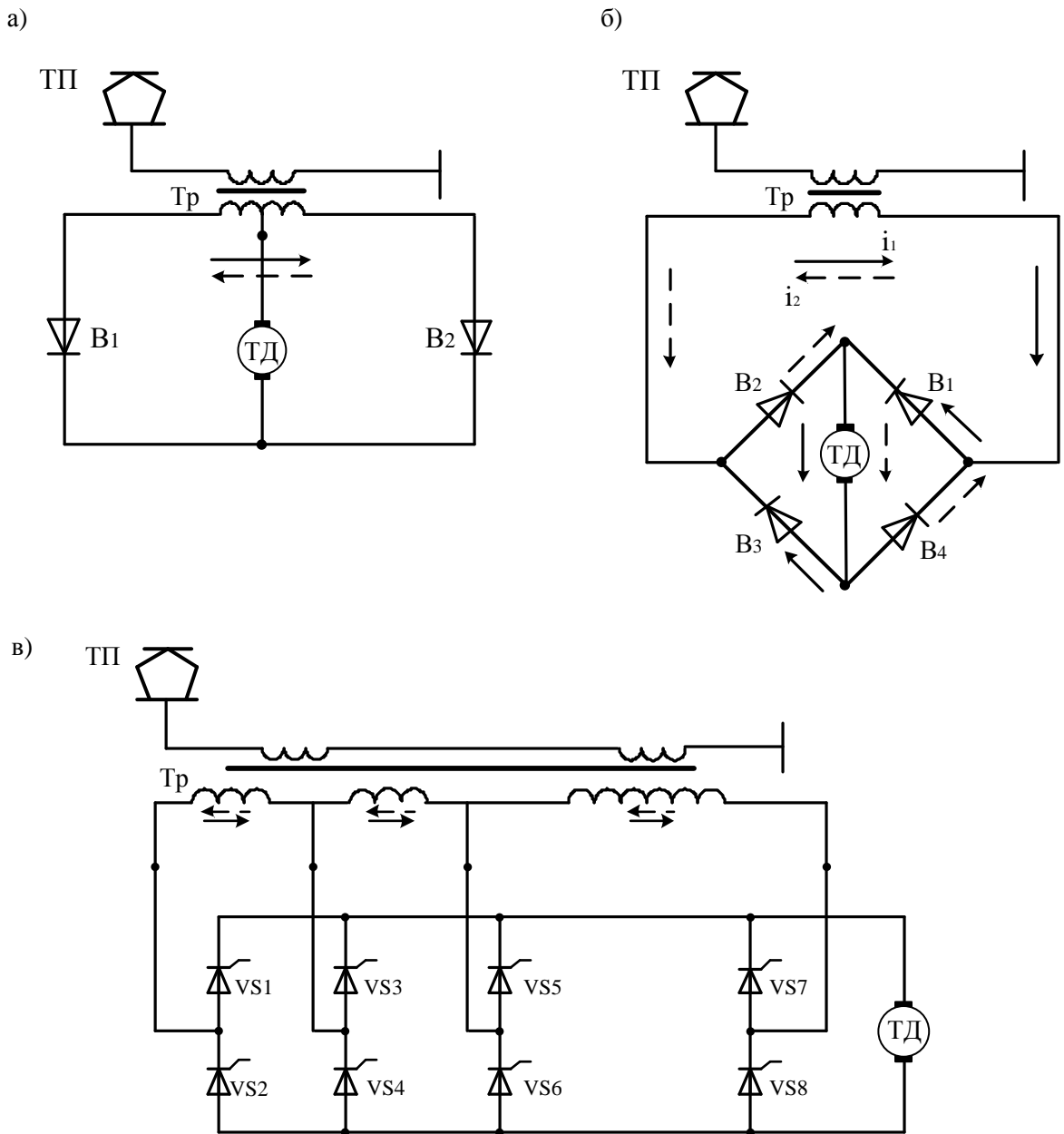
На електровозах застосовують декілька схем підключення випрямлячів до трансформатора: двопівперіодну схему із середньою точкою, класичну мостову схему та чотиризонний мостовий варіант (рисунок 1.4).

У схемі з нульовим виводом вторинна обмотка трансформатора поділяється на дві однакові частини, а випрямляч та тяговий двигун підключаються таким чином, як це відображено на рисунку 1.4, а.

У випадку, коли у першому півперіоді діюча електрорушійна сила і напруга спрямовані зліва направо, проводить струм вентиль В2, тоді як вентиль В1 залишається закритим, оскільки прикладена напруга діє в непровідному напрямку. Після зміни полярності ЕРС трансформатора провідним стає вентиль В1. У результаті, протягом кожного з двох півперіодів через тяговий двигун проходить струм, величина якого змінюється від нульового значення до максимуму та повертається назад до нуля.

У схемі з нульовим виводом вторинна обмотка трансформатора розділяється на дві однакові частини, а випрямляч разом із тяговим двигуном під'єднують так, як це показано на рисунку 1.4, а. У момент, коли електрорушійна сила, а разом із нею й напруга протягом першого півперіоду спрямовані зліва направо, струм пропускає відкритий вентиль В2, тоді як вентиль В1 залишається замкненим, оскільки прикладена напруга діє у зворотному, непровідному напрямку. Після зміни полярності е. р. с. трансформатора на протилежну провідним стає вже інший вентиль, що забезпечує проходження струму в другому півперіоді. У підсумку через

двигун упродовж обох півперіодів проходить струм, що змінює свою величину від нульової до максимального значення й повертається назад до нуля. Недоліком такої схеми є те, що під час кожного півперіоду працює лише половина вторинної обмотки трансформатора, що погіршує ефективність її використання.



а – з нульовою точкою; б – мостова; в – чотирьохзонна мостова

Рисунок 1.4 – Електричні схеми двохпівперіодного випрямлення

У мостовому варіанті випрямляча вся установка складається з чотирьох вентильних плечей, як показано на рисунку 1.4, б. Коли напруга у вторинній обмотці трансформатора спрямована зліва направо, струм проходить через вентиль В1, потім через навантаження, тобто двигун, далі через вентиль В3 і повертається у вторинну обмотку трансформатора, що наведено суцільними стрілками. Після зміни напрямку напруги шлях струму також змінюється: через вентиль В2 він надходить у навантаження, далі через вентиль В4 і повертається назад у трансформатор, що відображено пунктирними стрілками. Завдяки такій організації струм у кожному з півперіодів продовжує надходити до двигуна в одному й тому ж напрямку, подібно до роботи схеми з нульовою точкою.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Аналіз сучасних систем обліку споживання електроенергії на електровозах змінного струму

Облік електричної енергії є ключовою умовою здійснення економічних розрахунків між виробниками та споживачами електроенергії. На електровозах змінного струму сьогодні фіксація витрат електроенергії ведеться за допомогою електрولیчильників, які враховують не лише енергію, витрачену на тягу поїздів, а й ту її частину, що повертається в мережу під час рекуперативного гальмування. Лічильники дають можливість оцінити питомі енерговитрати на перевезення, визначити ефективність роботи локомотивних бригад у застосуванні режимів тяги та рекуперації, порівнювати енергетичні характеристики різних локомотивів, а також аналізувати економічну доцільність упровадження енергозберігаючих технологій.

Попри широке використання таких систем, вони мають суттєві недоліки, пов'язані зі схемними рішеннями вимірювальної апаратури та значною похибкою у визначенні витрати енергії. Цим питанням присвячено чимало наукових праць, серед авторів яких Молін Н. І., Хомяков Б. І., Находкін В.В., Капустін Л.Д., Бакланов А.А. та інші дослідники [6-10]. У їхніх роботах розкрито принципи вимірювання витрати електроенергії на електрорухомому складі змінного струму, проаналізовано стан існуючих вимірювальних систем та наведено напрями вдосконалення засобів обліку з метою підвищення точності. Проте, незважаючи на це, причини виникнення суттєвих похибок у системах обліку електроенергії, а також детальні процеси, що впливають на достовірність вимірювань, залишаються розкритими недостатньо повно.

На більшості сучасних серій електровозів змінного струму, де відсутні вимірювальні трансформатори напруги, застосовується спрощена схема

визначення витрати електроенергії. У такій схемі напруга для лічильників знімається з частини обмотки власних потреб на вторинній стороні тягового трансформатора, тоді як вимірювання струму здійснюється через трансформатор струму, встановлений у колі первинної обмотки. Пропорційної залежності між напругою в контактній мережі та напругою на обмотці власних потреб для різних типів електровозів не існує, тому для розрахунку питомої витрати енергії доводиться використовувати усереднені коефіцієнти трансформації, які суттєво відрізняються залежно від типу електровоза. Такий підхід призводить до значних похибок і придатний лише для порівняльного аналізу між локомотивами однієї серії.

За приклад можна взяти ситуацію, коли через значний комутаційний кут, що досягає 40–45 градусів зсуву фаз, внаслідок втрат напруги в індуктивному опорі обмоток тягового трансформатора рівень напруги на обмотці власних потреб, яка подається на лічильник, може відрізнятись від напруги на струмоприймачі на 10–20% за величиною і на 3–4 градуси за фазою, згідно з [2]. У підсумку похибка обліку електроенергії на локомотивах одного типу сягає не менше 10%, що спричиняє появу умовних втрат у системі тягового електропостачання.

На електровозах серії ВЛ85 перших випусків застосовувалася схема з високовольтним вимірювальним трансформатором напруги ОЛТ-0,1/25УХЛ1, первинна обмотка якого була підключена до первинної обмотки тягового трансформатора з напругою 25 кВ, тоді як вторинна обмотка з напругою 220 В використовувалася для живлення бортових електролічильників. Такий підхід забезпечував значно вищу точність вимірювання. Однак у наступних модифікаціях електровозів ці трансформатори перестали встановлювати через їхні конструктивні недоліки та недостатню надійність. Через це лічильники знову підключаються до обмоток власних потреб, що зберігає високу похибку вимірювань [3].

У роботі [4] наведено результати експериментального аналізу точності існуючих систем вимірювання на електровозах змінного струму. Результати досліджень дозволили приблизно оцінити похибки вимірювань залежно від типів тягових трансформаторів. З отриманих залежностей видно, що при використанні спрощеної схеми без вимірювального трансформатора напруги напруга, яка подається на лічильник, виявляється дещо завищеною порівняно з фактичною напругою на струмоприймачі, що автоматично призводить до завищення вимірюваного споживання електроенергії.

У праці [5] подано порівняння різних методів розрахунку активної, реактивної й повної потужності електрообладнання електровозів та визначення коефіцієнтів потужності. Автори показують, що методики, засновані на середніх та діючих значеннях струму і напруги за період, а також інтегральний підхід, базований на інтегруванні добутку напруги та приросту струму або струму і приросту напруги, можуть давати значну похибку — до 20% порівняно з методом реєстрації миттєвих значень параметрів і подальшим розкладанням отриманих сигналів у ряди Фур'є. Таким чином, найточніший розрахунок можливий лише за умови аналізу гармонійного складу струму та напруги, що вимагає значних обчислювальних ресурсів і застосування сучасних мікропроцесорних пристроїв із великою пам'яттю.

У підсумку найбільш достовірним способом визначення витрати електричної енергії є метод, що базується на реєстрації миттєвих значень напруги й струму та подальшому їх розкладанні на гармоніки протягом інтервалу часу, кратного періоду живильної напруги. Після цього, враховуючи внесок вищих гармонік, виконується точний розрахунок спожитої електроенергії. Саме цей підхід покладено в основу створення нової системи обліку витрати електроенергії на електровозах змінного струму.

Коректно організована система обліку електричної енергії є необхідною через те, що виробництво й споживання електроенергії відбувається практично одночасно, а тому помилка, допущена під час вимірювання, може

бути виправлена лише шляхом розрахунків, які самі по собі є непрямим способом та призводять до додаткових неточностей. Зменшення похибок можливе лише за умови створення такої системи, яка на основі миттєвих вимірювань та спектрального аналізу забезпечуватиме високоточний, оперативний і достовірний облік витрати електроенергії. Реалізація системи такого типу забезпечить можливість формування повної картини електроспоживання в умовах, наближених до реального часу, підвищить точність взаєморозрахунків з енергопостачальною організацією, сприятиме розробленню ефективних заходів енергозбереження, дозволить оптимізувати режими роботи локомотивів і формувати режимні карти для навчання локомотивних бригад, а також дасть змогу здійснювати прогнозування та аналіз балансу електроенергії.

2.2 Аналіз існуючих рішень в сфері автоматизованого обліку витрати електроенергії на електровозах змінного струму

Річне споживання електричної енергії, необхідної для тяги поїздів, до 2022 року становило 143 – 155 млрд кВт·год, а зараз знизилось до 113 – 130 млрд кВт·год і становить близько 85% усіх витрат електроенергії залізничного транспорту. Така статистика зумовлює постійну необхідність пошуку ефективних способів зменшення витрат енергоресурсів і удосконалення методів їх раціонального використання. За цих умов особливої ваги набуває організований і точний облік електроспоживання, який визначає можливість оптимізації режимів роботи електрообладнання тягової мережі й електрорухомого складу, а також сприяє формуванню дієвих механізмів економії енергії. На ряді українських залізниць проводяться заходи, спрямовані на заміну застарілих електrolічильників сучасними електронними та мікропроцесорними пристроями, одночасно розробляються

вдосконалені схеми їх підключення та впроваджуються автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії.

Покладання задачі обліку електроспоживання на мікропроцесорні комплекси зі спеціалізованим програмним забезпеченням забезпечує значну гнучкість функціонування системи, зменшує витрати ручної праці під час обробки інформації та дає помітний ефект завдяки скороченню трудомісткості оброблювання даних. Автоматичне вимірювання, що здійснюється без участі оператора, істотно підвищує продуктивність праці, забезпечує об'єктивність результатів і мінімізує похибки, спричинені суб'єктивним людським фактором. Такий підхід відкриває можливість проводити вимірювання у місцях, де участь оператора неможлива, дозволяє здійснювати тривалі та багаторазові вимірювальні цикли, контролювати значну кількість параметрів одночасно, досліджувати швидкоплинні процеси, де час зміни електричних величин порівнюваний із часом виконання вимірювання, а також забезпечувати постійний моніторинг енергоспоживання електровозів.

Існуючі автоматизовані вимірювально-обчислювальні комплекси застосовуються на електрорухомому складі для реєстрації параметрів роботи обладнання та режимів руху під час експлуатації й випробувань. Вони дозволяють виконувати реєстрацію електроспоживання на тягу поїздів, у своїй структурі включають різноманітні датчики, що формують сигнали різної фізичної природи, аналого-цифрові перетворювачі, які переводять ці сигнали у цифровий код, а також ЕОМ з периферійними пристроями, що забезпечують оперативне подання результатів у вигляді таблиць і графіків. Додатково в систему входять перетворювальні модулі, що стабілізують живлення її компонентів.

До початку 1980-х років випробування електрорухомого складу здійснювали за допомогою лабораторних вагонів, оснащених вимірювальними приладами аналогового типу, самописцями, магнітографами

та іншим спеціалізованим обладнанням, узгодження роботи якого та фіксація інформації створювали значні технічні труднощі. Поява персональних електронно-обчислювальних машин, придатних для встановлення на рухомих об'єктах, дала змогу кардинально змінити ситуацію й перейти до створення більш доступних та універсальних вимірювально-обчислювальних систем. У таких комплексах об'єднання роботи датчиків з ЕОМ забезпечувало автоматизоване збирання, зберігання та обробку даних, що вимагало відповідного програмного забезпечення.

У 1979–1980 роках у відділенні електрифікації ВНІЖТ було розроблено і в 1981 році випробувано автоматизовану систему для експериментального аналізу режимів роботи електровозів. У наукових джерелах детально обґрунтовано переваги автоматизованої реєстрації експериментальних даних порівняно з ручними методами. Така система забезпечувала одночасне вимірювання швидкостей обертання колісних пар електровоза та вагона-лабораторії, струмів тягових двигунів, напруги на струмоприймачі, сили тяги, активної та повної потужності, витрат електроенергії, положення контролера машиніста та інших параметрів. Реєстрація величин відбувалася дискретно, з можливістю зміни часових інтервалів, а оскільки сигнали мали різну природу, після датчиків встановлювалися аналого-цифрові перетворювачі. Це дозволяло використовувати як миттєві, так і середні або діючі значення параметрів залежно від режиму роботи вимірювального каналу. Обмін даними між АЦП і ЕОМ здійснювався через кодовий комутатор, який забезпечував запис інформації на машинний носій, що робило можливим її подальшу обробку як у стаціонарних умовах, так і безпосередньо під час руху.

Разом із тим, така апаратура займала значний обсяг, що вимагало її розміщення у спеціально обладнаному вагоні-лабораторії. Унаслідок цього контроль режимів роботи електрорухомого складу обмежувався лише випробувальними поїздками, а отже, не забезпечував можливості постійного

моніторингу енергетичних характеристик у реальних експлуатаційних умовах.

Фіксація витрат електроенергії на електрорухомому складі є визначальною складовою оцінювання роботи локомотивного господарства, адже понад третину експлуатаційних витрат становить оплата енергії на тягу. Нині лічильники зчитуються локомотивними бригадами вручну, після чого дані передаються в депо, де оператор вносить їх до автоматизованого робочого місця, що зумовлює появу похибок і спотворень. Крім людського чинника, проблемою є низька точність самих лічильників, нестабільність їх роботи та значний розкид показань. Усе це формує потребу в надійному й об'єктивному обліку електроспоживання.

Маршрутні листи машиністів залишаються основним документом, у якому фіксуються результати роботи електровоза, а напівзамкнена система їх обробки не має механізмів автоматичного коригування, оскільки не передбачає зворотного зв'язку між результатами вимірювань і роботою об'єкта. Удосконалення системи полягає у переході від чисто інформаційної моделі до інформаційно-управляючої, де результат вимірювань використовуватиметься для впливу на режими роботи електровоза у реальному часі. Такий підхід формує замкнуту систему керування, здатну автоматично реагувати на відхилення параметрів від заданих значень.

Подальший розвиток облікових і управляючих систем у локомотивному господарстві пов'язаний із широким впровадженням комп'ютерних технологій та сучасної електроніки, що дозволяє формувати нову концепцію обліку електроенергії, засновану на повній автоматизації процесу. Така система повинна забезпечувати достовірне визначення витрат електроенергії, автоматизоване отримання даних із бортового комп'ютера електровоза, коригування режимів роботи електровоза у разі відхилень параметрів, а також давати можливість визначати нормативи енергоспоживання для

пасажирських і вантажних перевезень, включно з енергозабезпеченням вагонів.

Точність обліку електричної енергії залежить від якості вимірювальних приладів. Електронні лічильники Ф440 і Ф442, що застосовуються на електровозах змінного струму, мають суттєві обмеження, оскільки працюють за принципом подвійної модуляції, яка перетворює енергію в імпульсний код із подальшим інтегруванням. Така конструкція не дозволяє одночасно враховувати електроенергію, спожиту в режимі тяги, та енергію, повернуту в мережу під час рекуперативного гальмування. Це вказує на необхідність застосування вимірювальних засобів, здатних фіксувати миттєві значення струму й напруги та виконувати подальшу цифрову обробку. Лічильники нового покоління типу «Альфа» із класом точності 0,5 більш придатні до таких завдань, оскільки мають електронну пам'ять, дисплей та здатні одночасно вимірювати як споживання, так і повернення електроенергії. Їх вимірювальна частина базується на АЦП та сигнальному процесорі, що дозволяє визначати основні параметри електричної мережі за миттєвими значеннями струмів і напруг. Проте ці прилади також не враховують енергію спотворення, яка виникає через наявність гармонік у струмі та напрузі, оскільки електровоз формує нелінійне навантаження.

Забезпечення метрологічної точності обліку вимагає правильного добору вимірювальних засобів та їх грамотного застосування в умовах експлуатації. Найбільший вплив на похибку мають систематичні відхилення вимірювальних пристроїв. Вимірювальний тракт включає трансформатори струму й напруги, лічильник електроенергії, лінії підключення та обладнання збору й передавання даних, яке входить до складу вимірювального каналу автоматизованих систем комерційного обліку.

2.3 Аналіз точності та достовірності обліку електричної енергії вимірювальними приладами

У застосовуваних сьогодні вимірювальних схемах електровозів змінного струму електронні лічильники типів Ф440 та Ф442 не забезпечують достатньої точності, оскільки ґрунтуються на принципі подвійної модуляції. Така методика перетворює вимірювану енергію в імпульсний код, який згодом інтегрується й накопичується відповідно до кількості активної енергії. Подібні пристрої не здатні одночасно вести облік енергії, що споживається в режимі тяги, і тієї, що повертається в мережу під час рекуперації, використовуючи лише один лічильник. Обмеженість цих електронних пристроїв свідчить про необхідність переходу до інших принципів вимірювання, здатних забезпечити вищу достовірність.

За умов активного впровадження енергозберігальних технологій потрібні прилади, які працюють на основі фіксації миттєвих значень електричних параметрів, що описують роботу електровоза, з подальшою їх цифровою обробкою. Для покращення точності обліку доцільно застосовувати сучасні лічильники змінного струму типу «Альфа» з класом точності 0,5. Ці прилади мають електронну пам'ять, індикатор для відображення показників та можуть поєднувати облік споживання й віддачі електроенергії в одному модулі, що дозволяє скорочувати кількість приладів на електровозах, обладнаних рекуперативним гальмуванням. Вимірювальна частина таких лічильників побудована на базі аналогово-цифрового перетворювача та сигнального процесора. АЦП фіксує миттєві значення величин, пропорційних фазним напругам і струмам, переводить їх у цифровий код і передає сигнальному процесору. Останній, отримавши ці дані, визначає середні значення напруги та струму за період мережі, а також обчислює активну, реактивну й повну потужності.

Попри свої переваги, такі лічильники також мають певні вади. Електровоз як нелінійне навантаження спотворює синусоїдальні форми струму та напруги, породжуючи гармонійні складові, які створюють енергію спотворення. Ця складова не виділяється окремо в обліку, що негативно впливає на точність результатів.

Метрологічне забезпечення процесу вимірювання електроенергії передбачає грамотний вибір вимірювальних засобів та їх правильне використання в реальних умовах експлуатації. Основою похибок обліку є дія систематичних відхилень вимірювальної апаратури. До складу комплексу обладнання, який формує результат вимірювання на електрорухомому складі, входять трансформатори струму та напруги, електролічильник, лінія під'єднання до трансформатора напруги, а також пристрої збору й передачі даних, що є частиною вимірювального каналу автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії.

На електровозах змінного струму використовуються електронні лічильники типів Ф440 і Ф442, розраховані на струм 5 А та напругу 220 В. Це створює необхідність трансформації струму й напруги, щоб забезпечити відповідність вимірювальним колам. Стумові входи лічильників під'єднані до трансформаторів струму, встановлених у первинному колі тягового трансформатора. Відсутність трансформаторів напруги на більшості серій електровозів призводить до використання спрощених схем вимірювання, коли напруга подається від обмотки власних потреб тягового трансформатора. Це стає джерелом значних похибок у визначенні фактичного обсягу електроенергії, яку електровоз витрачає на тягу поїздів.

Згідно з технічною документацією різні серії тягових трансформаторів мають неоднакові значення напруги на обмотках власних потреб. Унаслідок цього навіть за відсутності навантаження — коли вплив тягової обмотки на обмотку власних потреб виключений — напруга на клеммах лічильників різних серій електровозів помітно відрізняється за однакового первинного

значення. Компенсація таких систематичних відхилень шляхом введення коефіцієнта пропорційності між напругою на обмотці власних потреб та первинною напругою є надзвичайно складним завданням, адже ця похибка не є сталою і змінюється залежно від режиму роботи електровоза. Дослідження підтверджують, що в моменти вмикання вентиляторів або компресорів напруга на обмотці власних потреб знижується, тоді як напруга в контактній мережі залишається практично незмінною.

Гранично допустима відносна похибка вимірювального каналу діючої системи обліку визначається як середньоквадратичне значення, що включає у себе похибки трансформаторів струму та напруги, вимірювальних каналів і самого лічильника. Обчислення цієї величини здійснюється за формулою, наведеною у відповідній методиці.

$$\delta_w = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_{сч}^2},$$

де δ_I , δ_U , $\delta_{сч}$ – відносні похибки, що відповідають класам точності трансформаторів струму, трансформаторів напруги або каналів вимірювання струму й напруги, а також електролічильника, враховуються під час визначення загальної точності вимірювального комплексу.

Обчислення проводять на основі паспортних значень класів точності засобів вимірювання, наведених у відповідних джерелах. Отримані результати граничної допустимої відносної похибки каналу вимірювання електричної енергії в існуючій системі обліку споживання електроенергії електровозами змінного струму подані у таблиці 2.1.

Аналіз зведених даних демонструє, що заміна застарілих індукційних лічильників на електронні не дає суттєвого покращення точності вимірювання електроенергії. Отже, для зменшення похибок у процесі визначення обсягу електроенергії, яку споживають електровози змінного

струму, необхідним кроком є усунення недоліків у схемних рішеннях вимірювальної системи, що застосовується на електрорухомому складі.

Зменшення похибки у вимірювальному каналі напруги приблизно на 1,3 % можливе завдяки використанню в схемі вимірювання електроспоживання трансформатора напруги з литою ізоляцією типу ОЛТ-0,1/25УХЛ1. Подібним обладнанням оснащувалися перші серії електровозів ВЛ85, проте його застосування згодом припинили через недостатню надійність, виявлену під час експлуатації. Наразі отримати достовірні показники фактичного споживання електроенергії електровозом змінного струму можна лише за умови використання вимірювального трансформатора напруги ЗНОМ-35 з масляною ізоляцією або моделі ЗНОЛЕ-35-УХЛ-27500/100/127 з литою ізоляцією, встановлених на даху електровоза.

Під час розв'язання завдання, пов'язаного з оперативним отриманням даних про обсяг електричної енергії, спожитої електровозом, необхідно застосовувати автоматизовані вимірювальні комплекси, здатні обробляти, зберігати та передавати результати вимірювань. До таких комплексів належать автоматизовані системи комерційного обліку електричної енергії та автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи обліку, точність яких визначається відповідно до вимог інструкції РД 34.11.114-98, що регламентує нормовані метрологічні характеристики та загальні вимоги до таких систем.

Відомо, що підсумкова похибка вимірювання електроенергії формується з більш ніж тридцяти складових, серед яких близько двадцяти становлять додаткові складові похибки. Згідно з відповідними положеннями сукупну похибку вимірювання електроенергії за допомогою АСКУЕ можна подати у вигляді схеми, зображеної на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1 – Гранична відносна похибка каналів вимірювання споживання електричної енергії на електровозах змінного струму

Серія електровоза	Канал вимірювання струму			Канал вимірювання напруги			Лічильник електричної енергії			Вимірювальний комплекс витрати електроенергії
	Тип обладнання	Параметри	δ_i , %	Тип обладнання	Параметри	δ_U , %	Тип обладнання	Параметри	$\delta_{сч}$, %	δ_W , %
ВЛ60к, ВЛ60п/к	ТКЛП-0,66-300/5-ХЛ2	300/5 А	0,5	ОЦР-5600/25	25000/210 В	4,6	СО-И442	220 В, 5А	2,5	5,3
							Ф440	220 В, 5А	2,0	5,0
ВЛ80к (№ 64-624)	ТКЛП-0,66-300/5-ХЛ2	300/5 А	0,5	ОЦР-5600/25	25000/229 В	4,1	СО-И442	220 В, 5А	2,5	4,8
							Ф440	220 В, 5А	2,0	4,6
ВЛ80к (с № 625), ВЛ80т, ВЛ801с	ТКЛП-0,66-300/5-ХЛ2	300/5 А	0,5	ОДЦЭ-5000/25Б	25000/232 В	5,6	СО-И442	220 В, 5А	2,5	6,2
							Ф440, Ф442	220 В, 5А	2,0	6,0
ВЛ80р	ТК-40-0,5-300/5	300/5 А	0,5	ОДЦЭ-5000/25АМ	25000/231 В	5,0	Ф440	220 В, 5А	2,0	5,4
ВЛ85	ТКЛП-0,66-300/5-ХЛ2	300/5 А	0,5	ОНДЦЭ-10000/25-82	25000/225 В	2,3	Ф442	220 В, 5А	2,0	3,1
				ОЛТ-0,1/25УХЛ1	25000/2200 В	1,0	Ф442	220 В, 5А	2,0	2,3
ВЛ65, ЭП1	ТКЛП-0,66-300/5-ХЛ2	300/5 А	0,5	ОНДЦЭ-5700/25	25000/225 В	2,3	Ф442	220 В, 5А	2,0	3,1
							A2D-4-A0-00-T	220 В, 5А	0,5	2,4
2ЭС5К	ТКЛП-0,66-300/5-ХЛ2	300/5 А	0,5	ОНДЦЭ-5700/25	25000/225 В	2,3	A1D-4-A0-00-T	220 В, 5А	0,2	2,36

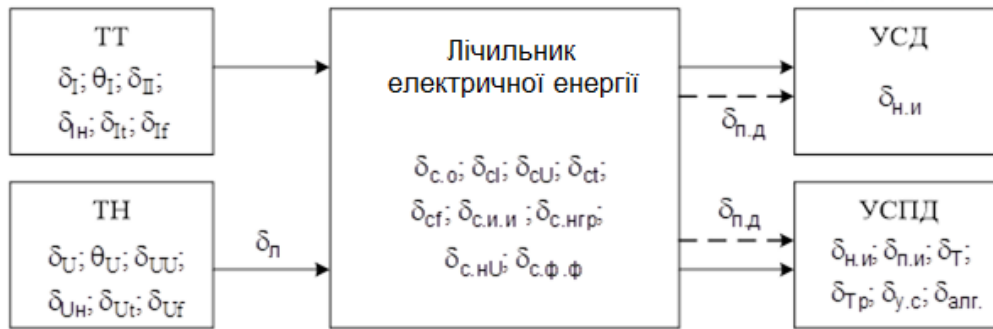


Рисунок 2.1 – Структурна схема вимірювального каналу АСКУЕ з складовими меж допустимої відносної похибки.

На основі джерела [14] граничне значення відносної похибки автоматизованої системи обліку, яке характеризує точність вимірювання за умов фактичної експлуатації, визначають за формулою (2.2).

$$\delta_W = \pm 1,1 \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_\theta^2 + \delta_{II}^2 + \delta_{c.o}^2 + \delta_{y.c}^2 + \sum_{j=1}^k \delta_{c_j}^2}, \quad (2.2)$$

У цій залежності використовується поправочний коефіцієнт 1,1, що відповідає прийнятій довірчій імовірності 0,95 та враховує особливості повірки засобів вимірювання за допомогою еталонних пристроїв, похибки яких також мають вплив. До структури виразу входять похибки трансформаторів струму й напруги, похибки трансформаторної схеми підключення лічильника, похибка, спричинена падінням напруги у лінії підключення, основна похибка електролічильника, а також сумарна похибка від пристрою збору та передавання даних, значення якої зазвичай не перевищує $\pm 0,05$ %. Додаткові похибки від j -ї величини впливу враховуються окремо, а їх кількість позначається відповідним коефіцієнтом k .

Відносну похибку визначення активної складової повного струму, що виникає через кутові похибки трансформаторів струму й напруги,

обчислюють згідно з формулою (2.3). У цьому виразі враховуються кутові відхилення трансформаторів, а також середнє за період обліку значення коефіцієнта потужності контрольованого приєднання.

$$\delta_{\theta} = 0,029 \sqrt{\theta_I^2 + \theta_U^2} \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}, \quad (2.3)$$

де θ_I – кутова похибка ТТ, хв; θ_U – Кутова похибка ТН, хв;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності контрольованого приєднання, усереднений за обліковий період.

Додаткові похибки електрорічильника, спричинені відхиленнями напруги, частоти, температури довкілля, зовнішніх магнітних полів і низки інших впливів, що відрізняються від нормованих умов, за яких гарантується відповідність класу точності, визначають на основі співвідношення (2.4).

$$\delta_{c_j} = K_j \Delta \xi_j, \quad (2.4)$$

де K_j – функція впливу j -ї величини, % на одиницю впливає величини;

$\Delta \xi_j$ – відхилення j -ї впливає величини від її нормального значення, од. чи %.

Аналіз отриманих залежностей свідчить про те, що формула (2.2) застосовна за умови випадкового характеру складових похибок при незаданих, умовно рівномірних законах їх розподілу та відсутності кореляції між ними. Крім того, складові похибки повинні мати співмірні значення, а розрахунок виконується для довірчої імовірності 0,95.

Згідно з чинними стандартами та технічними вимогами до вимірювальних засобів, межі допустимих кутових θ_I та струмових δ_I похибок трансформаторів струму, як і межі похибок лічильників $\delta_{c.o.}$, задаються у певних діапазонах струму. Для електрорічильників також

нормується похибка $\delta_{c.o}$ при різних значеннях коефіцієнта потужності, про що зазначається у державних стандартах.

Як показує аналіз складових сумарної похибки δ_w , наведений у джерелах [12, 16], за нормальних умов експлуатації, коли коефіцієнт потужності $\cos \varphi \geq 0,8$, найбільший вплив мають струмова похибка трансформатора струму δ_I , похибка трансформаторної схеми ввімкнення лічильника δ_θ та основна похибка самого лічильника δ_θ . Якщо коефіцієнт потужності знижується $\cos \varphi$ до 0,5, визначальним стає внесок похибки δ_θ . Ця похибка δ_θ може перевищувати похибки трансформатора струму δ_I та лічильника $\delta_{c.o}$ у 2–4 рази, а похибки трансформаторів напруги δ_U та пристроїв передавання даних δ_n — у 7–10 разів.

Отже, під час забезпечення необхідної точності вимірювання електроенергії треба приділяти особливу увагу коефіцієнту потужності, наявності електромагнітних та магнітних завад, асиметрії напруги, наявності її постійної складової в колі змінного струму, а також стабільності напруги живлення.

Варто зауважити, що під час вибору вимірювальних засобів вимоги до класу точності трансформаторів напруги можуть бути менш жорсткими порівняно з вимогами до трансформаторів струму та лічильників. Вимоги до похибки, пов'язаної з пристроями передавання даних, також можуть бути знижені у два-три рази. У реальних умовах експлуатації основний внесок у сумарну похибку вимірювань електроенергії, як правило, припадає саме на лічильник, тому рівень точності трансформаторів може бути нижчим, ніж вимоги до точності лічильного механізму.

У разі застосування високоточних вимірювальних засобів з класами точності 0,2S або 0,2 за умови дотримання нормальних умов експлуатації мінімальна похибка вимірювання активної електроенергії при коефіцієнті

потужності, близькому до одиниці, становить приблизно $\pm 0,5\%$ у робочому діапазоні струмів від 20 до 120 %. У найскладніших режимах така похибка може досягати приблизно $\pm 3,5\%$, тобто перевищувати мінімальне значення щонайменше у сім разів.

У разі вибору засобів середнього класу точності 1 мінімальне відхилення результатів вимірювання активної енергії в нормальних умовах при коефіцієнті потужності $\cos\varphi=1$ сягає близько $\delta_{W_{min}} = \pm 2,2\%$ у межах робочого струму від 20 до 120 % $I_{ном}$. У складних експлуатаційних умовах та за широких відхилень коефіцієнта потужності похибка вимірювання δ_W може складати от $\pm 7,4$ до $\pm 13,3\%$, тобто перевищувати $\delta_{W_{min}}$ в 6 разів [1].

Недооцінка впливу різних чинників здатна спричинити заниження фактичної похибки вимірювань електроенергії у декілька разів, інколи від двох до п'яти і навіть більше.

3 СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ЕЛЕКТРОВОЗАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1 Створення принципової електричної схеми електровоза змінного струму з тиристорними перетворювачами

Випрямно-інвертний перетворювач (ВІП) являє собою статичний електротехнічний пристрій, призначений для перетворення змінного струму або напруги у постійний режим (функція випрямлення), а також для трансформації постійного струму назад у змінний під час роботи в інвертному режимі. Схематичне зображення фізичної моделі такого перетворювача, яка входить до складу силової частини електровоза, наведено на рисунку 3.1, де демонструється процес випрямлення, характерний для електровозів змінного струму.

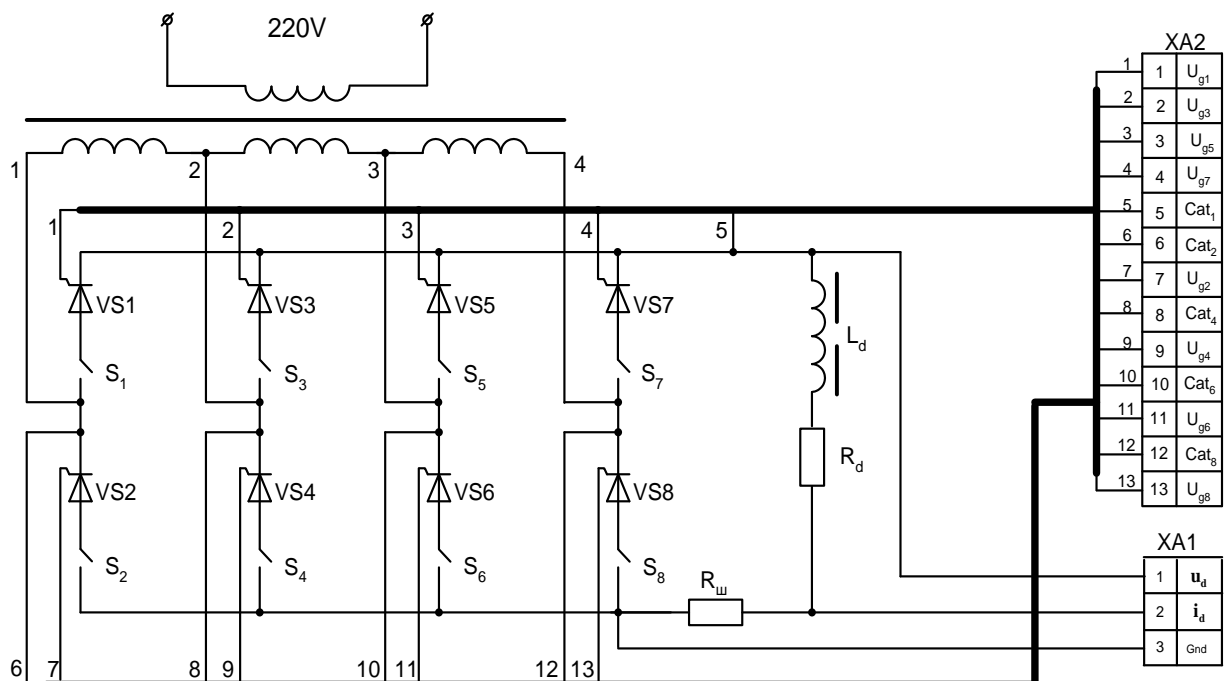


Рисунок 3.1 – Принципова схема фізичної моделі ВІП
в складі силової схеми електровоза

Силова частина електровоза представлена тяговим трансформатором, випрямно-інвертним перетворювачем та колом випрямленого струму, яке включає елементи L_d і R_d .

Сам перетворювач побудований на тиристорах типу КУ201Е, причому кожне з восьми силових плеч замінене одним тиристором (VS1–VS8). Для моделювання можливих відмов, зокрема обривів у плечах схеми, до кожного тиристора послідовно додається комутаційний елемент (S1–S8). Керування тиристорами відбувається згідно з алгоритмом роботи електровоза, що задається системою керування.

Фізична модель під'єднується до цієї системи керування через роз'єм ХА2. Миттєві значення випрямленої напруги та струму навантаження подаються через роз'єм ХА1 на аналогово-цифровий перетворювач універсального модуля Е440 для подальшої оцифровки. Навантаження перетворювача має активно-індуктивний характер, а оскільки проти-ЕРС у цьому колі відсутня, елемент L_d відтворює індуктивність кола випрямленого струму, а послідовно увімкнений елемент R_d доповнює активний опір L_d , до значення, необхідного для дотримання умов подібності. До навантажувального кола також підключено стандартний вимірювальний шунт, напруга з якого надходить на перший канал АЦП для фіксації миттєвих значень струму навантаження i_d . Другий канал АЦП отримує напругу навантаження u_d , яка знімається з виходу випрямленого кола.

На рисунку 3.2 подано осцилограми напруги u_d , струму i_d тягових електродвигунів та струму i_2 тягової обмотки трансформатора для режимів випрямлення, які забезпечує ВІП за умов синусоїдальної напруги контактної мережі. На цих графіках також зазначені фазові кути керування тиристорними плечами – α_0 , α_{03} , α_r та кути комутації γ_0 , γ_1 , γ_r . Показано

особливості формування випрямленої напруги u_d , а також поведінку струмів i_d і i_2 у режимі роботи ВПІ як випрямляча.

Головним чинником, який визначає тривалість інтервалів комутації, виступає ЕРС самоіндукції тягового трансформатора. Через це падіння напруги на активному опорі його обмоток, а також на відкритих тиристорах ВПІ при аналітичному визначенні комутаційних кутів можна не враховувати без суттєвого погіршення точності. З урахуванням такого припущення рівняння, що описує зміну струму комутації i_k у тиристорній групі, яка утворює буферний контур, набуває такого вигляду:

$$\frac{n}{4} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t = L_{mn} \frac{di_k}{dt};$$

Або в інтегральному вигляді:

$$\int_{-i_d}^0 di_k = \frac{1}{\omega L_{Tn}} \frac{n}{4} \sqrt{2} U_2 \int_{\alpha_0}^{(\alpha_0 + \gamma_0)} \sin \omega t d\omega t;$$

де U_2 – позначає діюче значення напруги тягової обмотки;

n – кількість навантажених четвертинних секцій цієї обмотки;

L_{Tn} – відповідає індуктивності трансформаторних обмоток, перерахованій до навантаженої частини тягової обмотки згідно з даними [17].

Розв'язання наведеного рівняння дає змогу встановити залежність комутаційних кутів від струму навантаження випрямно-інвертного перетворювача i_d , що відображається у співвідношенні:

$$\gamma_0 = \arccos\left(\cos \alpha_0 - \frac{4}{n} X_{Tn} \frac{i_d}{\sqrt{2} U_2}\right) - \alpha_0.$$

На рисунку 3.2 наведено діаграми напруги Δu_2 , яка відповідає малому відпайному сегменту тягової обмотки трансформатора, а також графіки

вихідної напруги u_d і струмів тиристорних груп I₃–I₆ за умови ідеального згладжування випрямленого струму в межах зони регулювання I.

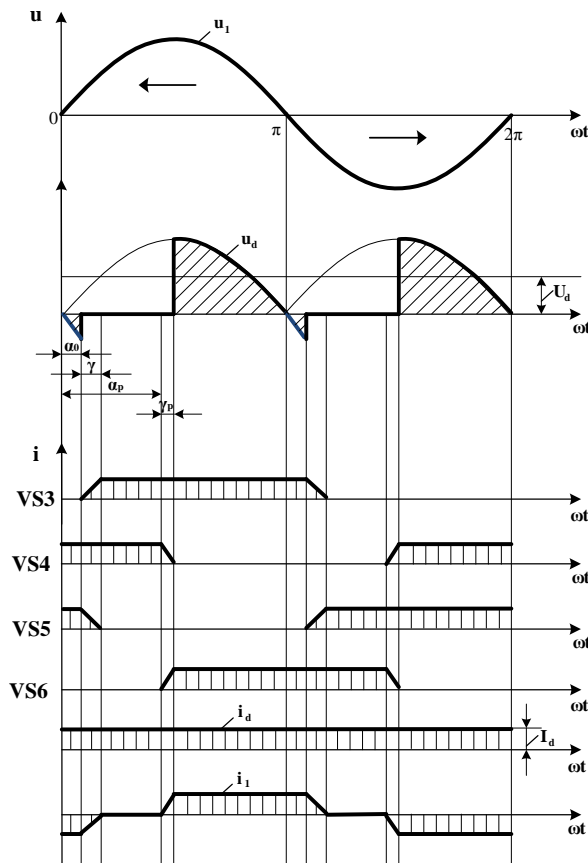


Рисунок 3.2 – Діаграми напруги і струмів для I-ї зони регулювання в режимі тяги

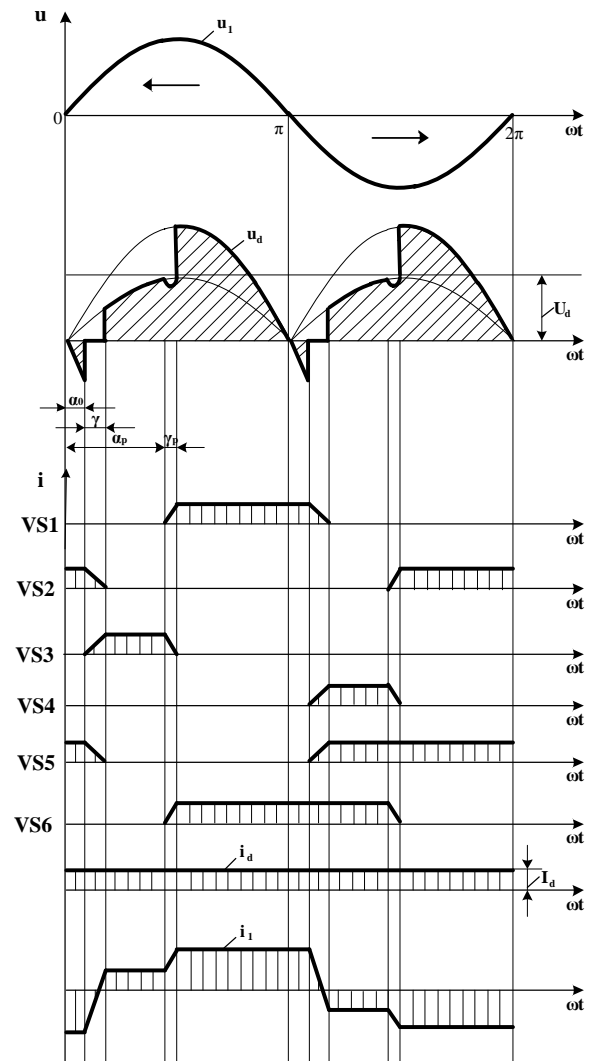


Рисунок 3.3 – Діаграми напруги і струмів для II-III зони регулювання в режимі тяги

На кресленні додатку А відображені процеси функціонування випрямно-інвертного перетворювача електровоза змінного струму під час роботи на четвертій зоні регулювання. Залежність комутаційних кутів тиристорних груп, що формують нерегульований і регульований контури, від

струму навантаження ВПП i_d визначається співвідношеннями, аналогічними тим, що наведені у [17]:

$$\begin{aligned}\gamma_I &= \arccos\left(\cos \alpha_{03} - \frac{4}{n-1} X_{m(n-1)} \frac{i_d}{\sqrt{2}U_2}\right) - \alpha_{03} ; \\ \gamma_P &= \arccos\left(\cos \alpha_p - 4X_{mp} \frac{i_d}{\sqrt{2}U_2}\right) - \alpha_p .\end{aligned}\quad (3.1)$$

У формулах, що задають кути комутації, символами X_{Tn} і X_{Tp} позначені індуктивні опори трансформаторних обмоток, приведені до відповідних навантажених секцій, до нерегульованої частини обмоток для певної зони регулювання, а також до регульовальної секції тягової обмотки трансформатора. Алгоритм керування тиристорними групами ВПП подано у таблиці 3.1.

Однією з характерних рис алгоритму роботи тиристорних груп у першій зоні є подача керуючих імпульсів одночасно на групи VS4–VS5 із максимальними значеннями регульовальних кутів α_{pmax} . Це необхідно для початкового відкривання моста та утворення безперервного струму навантаження i_d . Через це тиристорне плече VS5 отримує керувальний сигнал двічі впродовж провідного півперіоду — під фазовими кутами α_0 та α_p . Після відкривання груп VS4–VS5, що утворюють діагоналі моста з кутом α_{pmax} , у наступних півперіодах плече VS5 відкривається вже під кутом α_0 , щоб підтримувати роботу буферного контуру безперервного протікання струму i_d .

Друга особливість керування в межах першої зони полягає у почерговому утворенні в кожному півперіоді буферних контурів протікання випрямленого струму i_d за участю груп VS3–VS4 та VS5–VS6. Подібний принцип застосовується для рівномірного розподілу тривалого струмового навантаження між вентиляними групами буферного контуру, що особливо

важливо під час рушання електровоза з поїздом, коли значення регулювального кута α_p наближені до максимально допустимих. Зміна кута α_p здійснюється плавно контролером машиніста в діапазоні від приблизно $\alpha_{p \max} \approx 160^\circ$ до $\alpha_{p \min} \approx 20^\circ$.

Фазовий кут α_0 встановлюють таким чином, щоб миттєве значення напруги секції трансформатора Δu_2 залишалось більшим за порогове значення U_n , яке потрібне для відкривання плеча, що складається з трьох послідовно з'єднаних тиристорів. З урахуванням можливого зниження напруги контактної мережі та спотворення синусоїдальної форми напруги значення α_0 прийняте рівним $9^\circ \pm 2^\circ$. Наприклад, порогова напруга одного тиристора у складі плеча ВІІ із трьох послідовно ввімкнених силових елементів при відкриванні під кутом $\alpha_0 = 9^\circ$ визначається як:

$$U_n = \frac{1}{3} \sqrt{2} \Delta U_2 \sin \alpha_0 = \frac{1}{3} \sqrt{2} \cdot 315 \sin 9^\circ = 23,3 \text{ В}.$$

На другій–четвертій зонах регулювання у тяговому режимі система керування формує імпульси з інтервалами α_0 , α_{03} і α_p . Їх графічно подано на рисунку 3.3 та у кресленні додатку А. Імпульси з інтервалом α_0 подаються на тиристири суміжних груп (VS5–VS6 на другій зоні, а VS7–VS8 на третій і четвертій), які створюють буферний контур безперервного протікання струму тягових електродвигунів та забезпечують мережеву комутацію у контурі з вищим рівнем напруги. Для гарантованого відкривання тиристорів у контурі мережевої комутації з нижчою напругою керуючі імпульси задаються із затримкою на комутаційний кут γ_0 :

$$\alpha_{03} = \alpha_0 + \gamma_0.$$

З цієї ж причини мінімальне значення регулювального кута має задовольняти умову:

$$\alpha_{p \min} \geq \alpha_{03} + \gamma_1.$$

Регулювання починають із першої зони, у якій у роботі задіяні чотири плеча: VS3, VS4, VS5 та VS6. Алгоритм функціонування цих плечей для кожної зони наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Алгоритм управління плечими ВІП по зонах в режимі тяги

Зона	Півперіод	Імпульси управління по плечам ВІП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
1	←			α_0		α_0, α_p			
	→				α_p		α_p		
2	←	α_p		α_0			α_0		
	→		α_p		α_p	α_p			
3	←			α_p		α_0			α_0
	→				α_p		α_{03}	α_0	
4	←	α_p		α_0					α_0
	→		α_p		α_0			α_0	

Примітка: VS1, VS2, VS3, VS4, VS5, VS6, VS7, VS8 — плечі ВІП.

У режимі тяги автоматична система керування реалізує чотири зони фазового регулювання роботи випрямно-інверторних перетворювачів, забезпечуючи стабілізацію швидкості руху та струму тягових електродвигунів за умов послідовного збудження. Для розширення меж регулювання швидкості передбачено три щаблі дискретного ослаблення збудження, що дозволяє підтримувати сталі значення струму тягових електродвигунів у перехідних режимах. Функціональна схема САУ представляє собою двоконтурну структуру з зовнішнім незалежним контуром стабілізації швидкості та внутрішнім підпорядкованим контуром регулювання струму тягових двигунів. Усі перетворення та обробка сигналів

формування задаючого струму якорів тягових електродвигунів ЗСЯ сигнал із меншою величиною.

Блок ЗСЯ забезпечує плавне збільшення задаючого значення струму якорів протягом 2–3 секунд до встановленого рівня, а також корекцію цього струму відповідно до сигналів блоку захисту від боксування та юзу БЗБЮ. Отриманий на виході цифровий сигнал, що дорівнює заданому значенню дійсного струму $I_{яз}$, надходить в елемент порівняння струму ПС2.

Зворотний зв'язок за значенням струмом забезпечують датчики струму якорів (ДСЯ1–ДСЯ6). Аналогові сигнали цих датчиків перетворюються аналого-цифровими перетворювачами (АЦП) у цифрову форму та масштабуються відповідно до реальних значень струмів якорів. Оскільки струм якоря є пульсуючим через живлення двигунів випрямленою напругою, а фазове керування ВПП здійснюється за середнім значенням струму, зчитування цифрової інформації з АЦП проводять багаторазово протягом кожного півперіоду зміни напруги тягової обмотки. У програмному блоці обробки сигналів датчиків струму якорів (БДСЯ) обчислюються середні значення струму за кожен півперіод та визначається найбільший за модулем сигнал серед них. Розрахунок синхронізується сигналом, який формує блок фазової синхронізації (ФС) під час переходу основної гармоніки напруги датчика ДН через нуль. Найбільше значення струму надходить до елемента порівняння (ПС2).

Зворотний зв'язок за максимальним сигналом струму забезпечує регулювання ВПП відповідно до навантаження найбільш завантаженого тягового електродвигуна, що унеможливорює його перевантаження та виникнення розносного боксування.

Сигнал розузгодження за струмом $\Delta I_{я} = I_{яз} - I_{ядт}$ надходить до програмного регулятора струму якорів (РСЯ), де за пропорційно-інтегральним законом обчислюється значення керуючої змінної, яка передається до програмованого таймера (ПТ).

Таймер відраховує від переднього фронту імпульсу синхронізації часовий інтервал, що відповідає обчисленій змінній регулятора, і передає інформацію в блок зонно-фазового управління (БФУ), де формуються імпульси керування тиристорними плечами ВП.

Блок БФУ генерує імпульси керування для всіх зон регулювання згідно з алгоритмом роботи тягового режиму, наведеним у таблиці 3.1.

Імпульсні сигнали з блоку БФУ надходять до модуля формування вихідних сигналів (ВС), вихідні канали якого підсилюються за амплітудою, тривалістю та потужністю, розділені гальванічною ізоляцією з колами МСУР і передаються до формувачів імпульсів керування силовими тиристорами ВП1 та ВП2.

Блок цифрової обробки імпульсів осьових датчиків БДС визначає середню швидкість руху за періодом або частотою зміни сигналів кожного датчика. Із цих даних вибирається сигнал із найменшим значенням, який потім подається в елемент порівняння швидкості ПШ1. Керування за найменшим сигналом швидкості усуває системну похибку у випадку боксування однієї з колісних пар. Принципова електрична схема електровоза змінного струму з тиристорними перетворювачами податку Б.

3.2 Принципова електрична схема системи автоматизованого обліку споживання електроенергії на електровозах змінного струму

У сучасному локомотивному господарстві використовується інформаційно-довідкова, незамкнена система контролю витрат електроенергії на тягу поїздів. Її особливістю є те, що функціонування системи не залежить безпосередньо від результатів впливу на керований об'єкт, тобто в ній відсутня зворотна взаємодія. Перехід до планувально-керувальної автоматизованої системи можливий за умови поєднання вихідних і вхідних

ланок так, щоб вимірювальні прилади, фіксуючи характеристики процесів, що відбуваються у керованому об'єкті, одночасно ставали джерелом впливу на систему. Величина цього впливу має визначатися тим, наскільки виміряні параметри відхиляються від необхідних значень, у результаті чого утворюється замкнений контур управління.

Замкнутий контур автоматизованої системи обліку електричної енергії на електрорухомому складі може бути представлений функціональною схемою, наведеною на рисунку 3.5. Схема керування системою обліку відображена на кресленні додатку В.

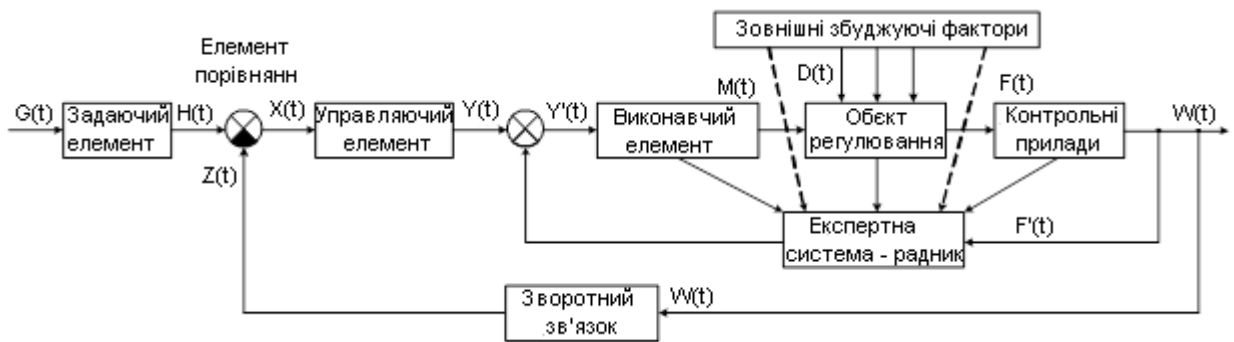


Рисунок 3.5 – Функціональна схема автоматизованої системи обліку електричної енергії на електрорухомому складі

Норми витрат електричної енергії визначаються для кожного філіалу ВАТ «Укрзалізниці» на рік за результатами аналізу за два попередні роки. Аналогічні розрахунки виконуються локомотивними службами відповідних філіалів, після чого ці дані узгоджуються між структурами. На основі отриманих значень у керівництві залізниці розподіляються нормативи для окремих відділень, які надходять щоквартально з розбивкою по місяцях. Інженер-теплотехнік локомотивного депо розподіляє встановлені норми на рейси, враховуючи попередній досвід та специфіку маршрутів.

Зовнішні приписи, накази та вказівки підрозділів перетворюються за допомогою задаючого елемента (АРМ інженера-теплотехніка) у заплановану

норму витрат електроенергії на поїздку, що за своєю фізичною суттю співставна із сигналом зворотного зв'язку. Елемент порівняння визначає величину розбіжності в системі, виконуючи віднімання відповідних параметрів. У локомотивному депо ця функція реалізується через систему облікової документації, розрахованої на ручну обробку. Управляючий вплив формується машиністом-інструктором та машиністом локомотивної бригади на основі аналізу причин відхилення та власного досвіду, що надає системі ознак автоматизованої, а не повністю автоматичної. Під дією цього впливу система керування електровоза забезпечує регулюючий вплив на об'єкт керування, спрямований на усунення розбіжності.

Об'єктом регулювання є електрорухомий склад у цілому, який поєднує силові та керуючі електричні кола. На роботу системи впливають зовнішні чинники, зокрема погодні умови, зміни напруги контактної мережі, коливання сили зчеплення коліс із рейками та інші фактори. Інформація про роботу електровоза відображається на контрольних засобах, до яких у цьому випадку належать не лише прилади для спостереження за режимами руху, а й обладнання для фіксації, зберігання та передавання даних. Вихідним результатом контрольних пристроїв є інформація про витрати та якість електроенергії з первинної обмотки тягового трансформатора, що зберігається у змінному електронному накопичувачі протягом рейсу та разом із заповненим маршрутним листом передається до групи обліку депо.

На підставі аналізу показників роботи електровоза «експертна система-радник» формує оцінку енергоспоживання щодо параметрів, які були досягнуті в результаті впливу машиніста на систему керування. Такий підхід дає змогу системі коригувати витрати електроенергії у процесі руху. Наявність цього елемента в структурі автоматизованої системи значно спрощує один із найбільш трудомістких етапів — обробку отриманої інформації та формування коригувального впливу.

Розглянемо детально склад контрольних пристроїв замкненого контуру системи автоматизованого обліку електроенергії. Оскільки він містить датчики струму та напруги, модулі для збирання та передавання даних, а також ЕОМ із програмним забезпеченням для оперативної обробки, такий комплекс утворює вимірювальну систему. Вона являє собою поєднання вимірювальних і обчислювальних компонентів, які формують канали вимірювання та допоміжні пристрої, що функціонують як єдиний комплекс. Її призначення полягає у фіксації стану об'єкта шляхом перетворення змінних у часі та розподілених у просторі параметрів, які характеризують відповідні процеси; у машинній обробці вимірювань; у відображенні та фіксації результатів, а також у формуванні вихідних сигналів для різних цілей.

В основу вимірювальної системи закладені сучасні засоби обчислювальної техніки, що застосовують методи реєстрації миттєвих значень електричних параметрів, характерних для роботи електровоза, із подальшою цифровою обробкою. Технічне оснащення системи обліку включає вимірювальні засоби струму і напруги, що перетворюють аналогові параметри в цифрову форму; засоби збирання та передавання інформації; канали зв'язку з відповідною апаратурою; а також комп'ютерну техніку, яка забезпечує обробку даних.

Запропонований макет системи містить датчики струму та напруги компенсаційного типу LEM, які широко застосовуються у сфері залізничного транспорту та забезпечують електронне перетворення параметрів первинної обмотки трансформатора в пропорційні сигнали вихідних кіл із гальванічною розв'язкою; пристрій збирання та передавання даних USB-6009 від National Instruments; комп'ютер ASUS X553MA з пакетом програм NI-DAQmx Software, VI Logger 2.0 і LabVIEW.

Початкові дані надходять у комп'ютер через модуль збору даних і далі обробляються у програмному середовищі LabVIEW за допомогою віртуальних приладів. Схема системи обліку електроенергії з вимірювальним

комплексом відображена на кресленні додатку Г. Обробка сигналів виконувалася через пристрій USB-6009, а подальший аналіз із визначенням показників якості електроенергії здійснювався на ПЕОМ ASUS X553MA у програмному забезпеченні National Instruments та Microsoft Excel.

Використання датчиків струму і напруги разом із пристроєм збору даних та програмним середовищем LabVIEW забезпечує реєстрацію миттєвих параметрів і можливість розкладання сигналів у гармонічні складові за Фур'є. Це дозволяє безперервно визначати споживання електроенергії та рівень спотворення синусоїдальної форми напруги. Застосування такого підходу виключає потребу у проміжних ланках обробки, таких як електролічильники та маршрутні листи, усуваючи вплив людського фактору.

3.3 Віртуальний пристрій для вимірювання споживання та показників якості електричної енергії, яку використовують електровози

Сучасний розвиток інформаційних і комп'ютерних технологій сприяв появі нових напрямів як у наукових дослідженнях, так і в інженерній практиці. Одним із перспективних рішень у сфері автоматизації експериментів різного призначення та керування технологічними процесами став віртуальний вимірювальний інструмент, що забезпечує автоматизацію процесів визначення параметрів фізичних і електромагнітних явищ. Поняття віртуального приладу (ВП) охоплює персональний комп'ютер, укомплектований спеціальними апаратними засобами та програмним забезпеченням, завдяки чому пристрій виконує функції вимірювальної системи, а користувач працює з ним так, ніби взаємодіє зі спеціалізованим електронним обладнанням [18].

Реальним прикладом реалізації концепції віртуального вимірювального комплексу є програмно-інженерний пакет LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Це прогресивне інтегроване середовище, створене для розроблення прикладних програм, що виконують функції віртуальних приладів. Воно поєднує в собі сучасні методи автоматизації проектування, включаючи принципи об'єктно-орієнтованої технології, потокове програмування, модульність, ієрархічну структуру та використання графічної мови програмування.

Застосовуючи можливості середовища LabVIEW, можна оперативно створити в межах персонального комп'ютера інтерфейсну панель, що забезпечує відображення результатів і керування віртуальним приладом, а також розробити алгоритм його роботи відповідно до поставленої задачі. Програмне середовище LabVIEW є аналогом традиційних середовищ для розробки на мовах C чи BASIC, а створені в ньому програми отримали назву віртуальних приладів, оскільки за призначенням і принципами роботи повторюють функціонування реальних вимірювальних систем.

У середовищі LabVIEW міститься набір підпрограм, які дозволяють виконувати конфігурацію, збір і передачу даних на спеціальні DAQ-пристрої (Data Acquisition). Такі пристрої виконують функції аналого-цифрового перетворення, цифрового вводу-виводу тощо, підключаючись з одного боку до комп'ютера, а з іншого — до реальної електричної схеми через відповідні датчики та перетворювачі. Після отримання сигналу DAQ-пристрої здійснює його попередню обробку та передає у цифровому вигляді на комп'ютер, де формується повноцінна вимірювальна система. При цьому DAQ-комплекс лише оцифровує сигнал, а подальші операції збору, аналізу та візуалізації виконуються за допомогою віртуальних приладів у LabVIEW.

Таким чином, використовуючи інструментарій LabVIEW, можна створити віртуальний прилад для визначення показників споживання електричної енергії. Процедура його розроблення складається з етапів

формування лицьової панелі та побудови блок-діаграми. Інтерфейсна панель приладу, призначеного для автоматизованого контролю витрат електроенергії, що використовується на тягу поїздів, містить елементи керування, індикації та графічного подання вимірюваних характеристик (рисунок 3.6). Вона забезпечує відображення кривих струму та напруги первинної обмотки тягового трансформатора з можливістю зміни масштабів та положення графіків відносно осі часу в режимі роботи, спектрального складу відповідних сигналів, показників спотворення синусоїдальної форми для напруги та струму, коефіцієнта потужності електровоза, динаміки частоти, струму та напруги, а також значень активної, повної та корисної потужностей, еквівалентної реактивної складової та показників активної електричної енергії.

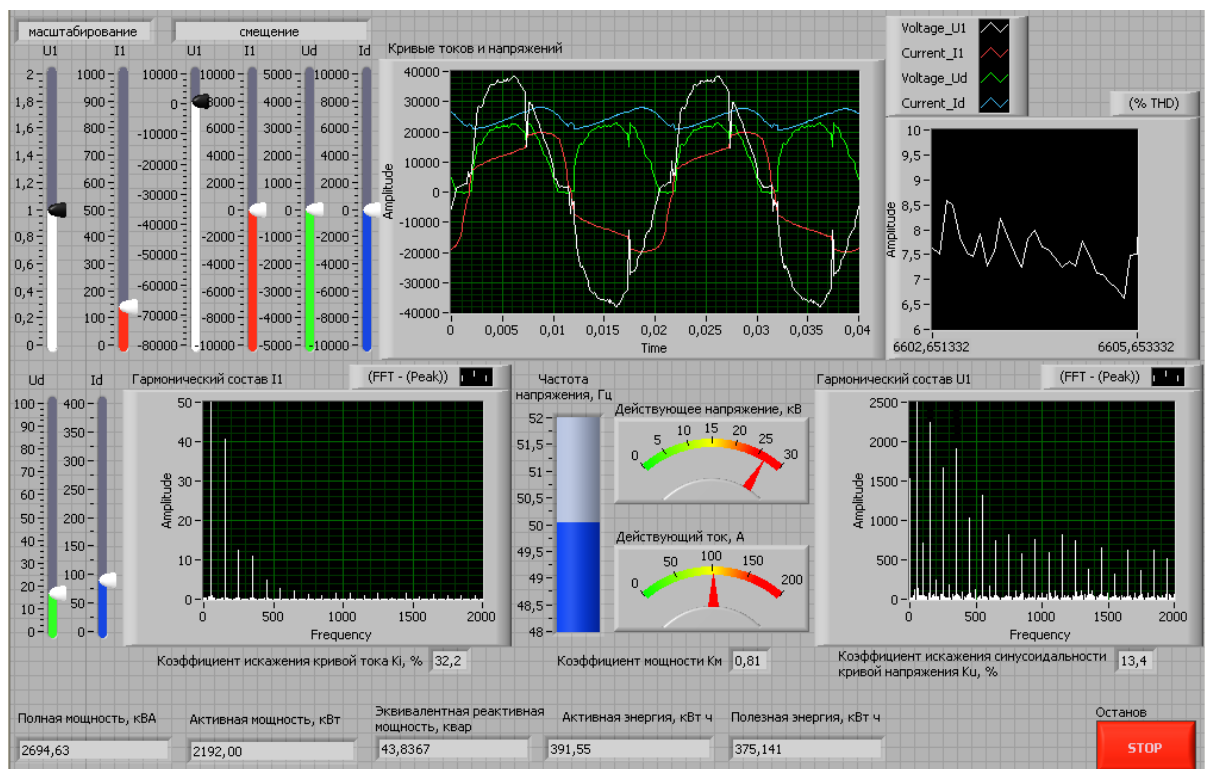


Рисунок 3.6 – Лицьова панель ВП автоматизованої системи обліку витрати електричної енергії.

Блок-діаграма цього віртуального приладу, наведена на рисунку 3.7, створена на основі структури циклу While Loop, що відповідає команді `do {програма} while {умова}`. Усередині циклу розташовані лічильник ітерацій і блок перевірки умови завершення роботи.

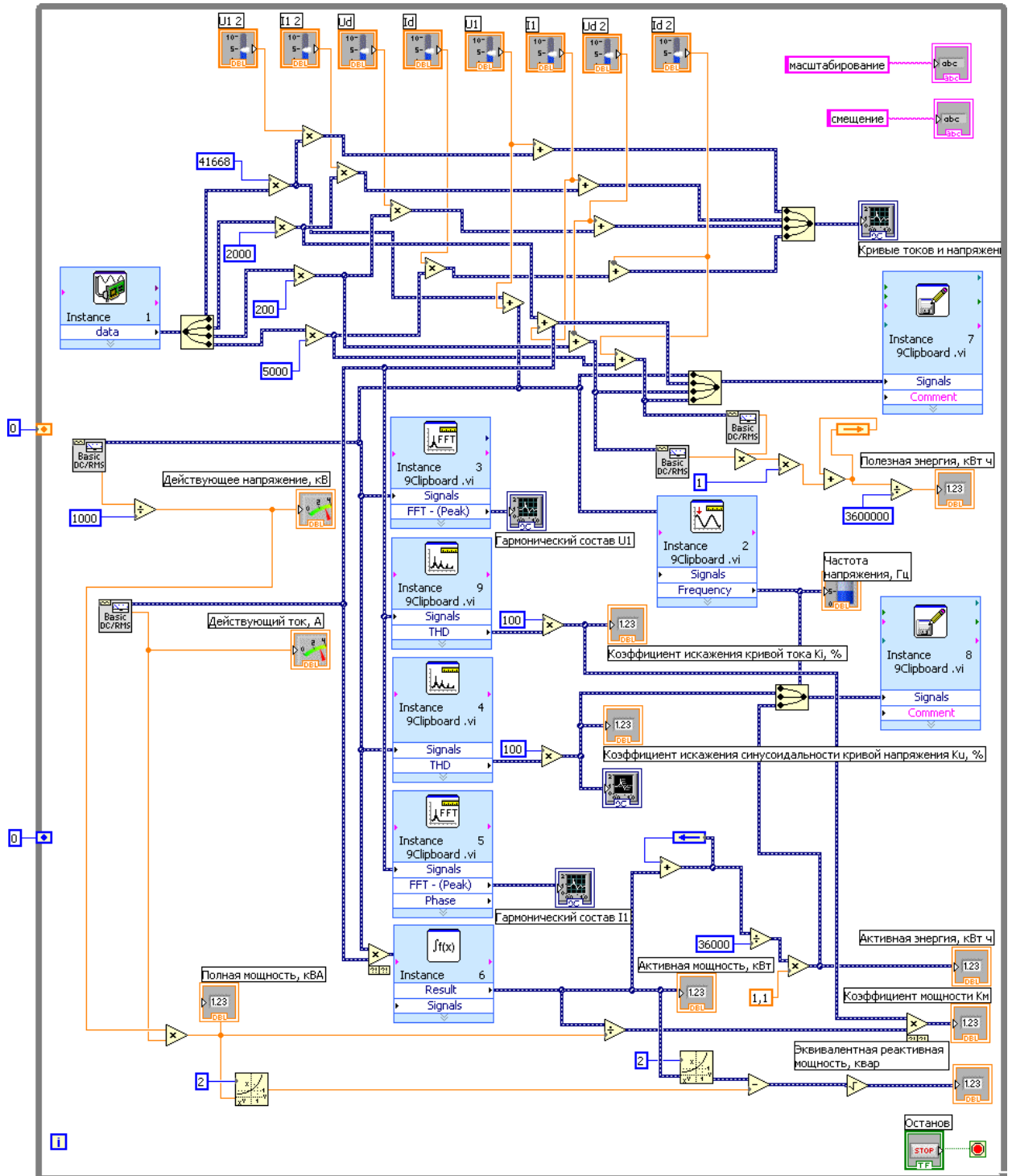


Рисунок 3.7 – Блок-діаграма ВП автоматизованої системи обліку витрати електричної енергії.

Циклічна структура забезпечує безперервне виконання зібраної всередині неї програми до моменту надходження на її вихід логічного сигналу «Істина», що відображає команду зупинки. Завершення виконання здійснюється при активації режиму «Stop If True» у результаті натискання кнопки STOP на лицьовій панелі [19].

Збір аналогових сигналів напруги та струму виконується засобами експрес-інструмента DAQmx Assistant. На цьому етапі здійснюється вимірювання параметрів напруги та струму первинної обмотки тягового трансформатора, напруги випрямленого ланцюга між шинами інверторно-випрямного перетворювача та випрямленого струму, що подається на якорі тягового двигуна. Всі дані відображаються на графічному індикаторі Waveform Graph, який імітує роботу осцилографа.

Миттєві значення досліджуваних величин підлягають обробці: за допомогою функцій Basic Average DC-RMS визначаються постійна складова та ефективні значення параметрів, а експрес-прилад Spectral Measurements проводить спектральний аналіз сигналів методом швидкого перетворення Фур'є. Гармонічні складові струму та напруги візуалізуються у вигляді гістограм, а засоби множення та додавання використовують для визначення повної потужності. Активна потужність обчислюється через інтегрування сигналу у часовій області засобами інструмента Time Domain Math, який виконує функцію інтегрування сигналу ($\text{Integral } x(t)$) в часі.

Витрати електричної енергії, яку споживає локомотив під час руху, визначаються шляхом підсумовування активної потужності за допомогою вузла «Зворотний зв'язок» (Feedback Node) та множення отриманої величини на час поїздки. Зміни частоти напруги у контактній мережі відображаються за допомогою числового індикатора та експрес-віртуального приладу «Вимірювання гармонічних коливань» (Tone Measurements), що дозволяє виділяти єдину гармонічну складову в заданому частотному діапазоні від 52 до 48 Гц і визначати її поточне значення.

Експрес-інструмент «Вимірювання спотворень» (Distortion Measurements) застосовується для аналізу якості сигналу напруги, тобто для визначення величини спотворення синусоїдальної форми напруги і струму, що характеризуються коефіцієнтом нелінійних спотворень THD. Відображення цих величин у відсотках реалізується за допомогою графічних індикаторів типу Waveform Chart, які працюють за принципом самописця, накопичуючи та демонструючи всі одержані дані у вигляді послідовності числових значень.

Протягом усього маршруту руху локомотива віртуальний прилад автоматизованої системи контролю споживання електричної енергії здійснює запис усіх результатів вимірювання у файл формату *.lvm, використовуючи експрес-процедуру Write LabVIEW Measurement File. У межах запропонованого віртуального приладу формуються два окремі файли: перший містить миттєві значення струмів і напруг, другий — дані про частоту живильної напруги у герцах, коефіцієнти спотворення синусоїдальності напруги і струму у відсотках, коефіцієнт потужності електровоза, а також величину активної електричної енергії, виражену в кВт·год [18].

4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

4.1 Методологія математичного моделювання електромагнітних процесів

На етапі проектування найбільш поширеним теоретичним способом дослідження фізичних об'єктів та пов'язаних із ними явищ є математичне моделювання. Цей підхід ґрунтується на створенні спеціальних моделей, у яких забезпечується подібність математичних рівнянь та однозначна відповідність між змінними, що описують оригінальний об'єкт і його модельне представлення. Побудова моделі електромагнітних процесів у електричному колі починається зі створення еквівалентної схеми заміщення, після чого здійснюється її математичний опис і формування відповідної математичної моделі. Створена модель стає основою для розробки алгоритму, який відтворює роботу електричного кола та електромагнітні процеси, що в ньому відбуваються. Далі цей алгоритм реалізується у вигляді комп'ютерної програми, за допомогою якої виконують дослідження.

Перетворення математичної моделі на програмний продукт здійснюється з використанням спеціалізованих пакетів схемотехнічного моделювання. Такі програмні комплекси базуються на модульній структурі, що дає можливість змінювати окремі компоненти моделі та досліджувати різні варіанти реалізації елементів електричного кола в різних комбінаціях. Робота з такими пакетами організована у діалоговому режимі, що робить процес моделювання зручнішим для користувача.

Одним із найбільш відомих інструментів для математичного моделювання є комплекс схемотехнічного аналізу OrCAD версії 9.2, створений компанією OrCAD. За його допомогою здійснюється розрахунок електротехнічних схем будь-якої складності шляхом розв'язання систем

диференціальних рівнянь, що описують електричні та магнітні перехідні процеси в колах електровоза. Спрощена структурна схема моделювальної системи OrCAD 9.2 наведена на рисунку 4.1, а позначення основних файлів, які використовуються в системі, вказано безпосередньо на лініях зв'язку [20].

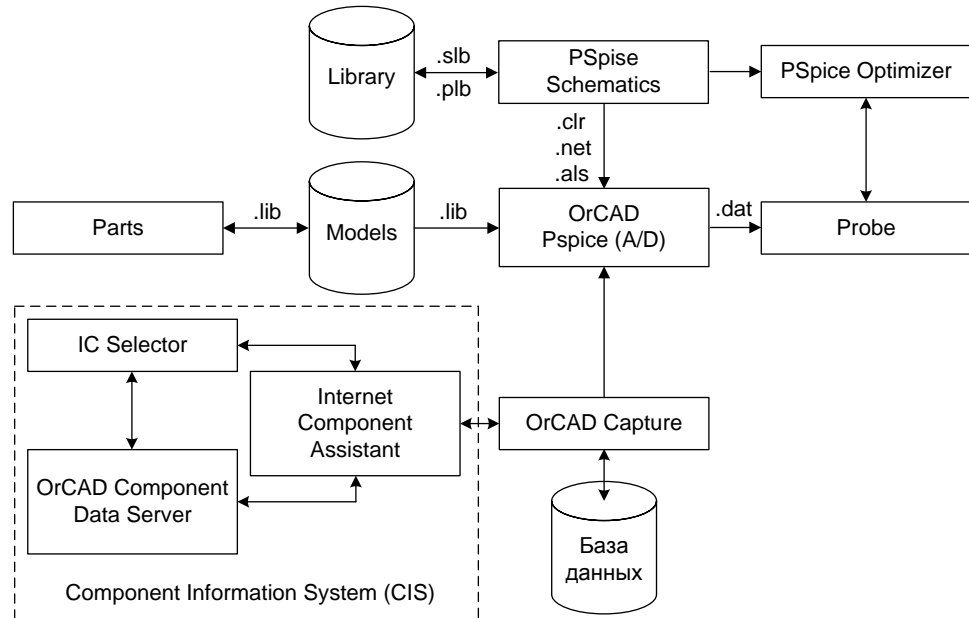


Рисунок 4.1 – Спрощена структурна схема системи управління базою даних OrCAD 9.2

У процесі розрахунків застосовуються файли з такими розширеннями:

.lib — текстові бібліотеки математичних моделей компонентів, створені у форматі SPICE;

.plb — бібліотеки компонентів, що включають характеристики та інформацію про їх побудову;

.slb — графічні символи компонентів;

.clr — текстовий файл, у якому задаються параметри моделювання для PSpice;

.net — опис з'єднань схеми;

.als — таблиці відповідності виводів компонентів підключеним до них електричним колам;

.dat — двійковий файл результатів моделювання для подальшого аналізу у програмі Probe.

При дослідженні електромагнітних перехідних процесів у системі «контактна мережа – електровоз» з можливістю визначення витрат електричної енергії пакет OrCAD 9.2 використовує низку програмних модулів. До них належать OrCAD Capture, який слугує графічним середовищем для створення електричних схем і запуску процедур аналогового, цифрового чи змішаного моделювання; OrCAD Capture CIS, що доповнений системою керування базою даних компонентів та забезпечує доступ до великого каталогу елементів; OrCAD PSpice A/D, який виконує моделювання аналогових та аналого-цифрових пристроїв; Parts — програма для визначення параметрів моделей напівпровідникових і магнітних компонентів; PSpice Schematics — редактор принципів схем, який також є інтерфейсом для запуску моделювань; PSpice Optimizer — засіб параметричної оптимізації електронних пристроїв за заданим критерієм з урахуванням нелінійних обмежень.

Об'єднана структурна схема моделі системи «контактна мережа – електровоз» наведена на кресленні додатку Д.

Для того щоб оцінити вплив усталених і перехідних електромагнітних процесів у цій системі на точність вимірювання витрат електричної енергії, потрібно сформулювати узагальнену математичну модель. Оскільки електровоз змінного струму у процесі роботи постійно взаємодіє з контактною мережею та через неї з тяговими підстанціями, під час побудови моделі застосовують принцип поділу комплексної моделі на взаємопов'язані окремі підмоделі. Використання такої методики на основі інструментів OrCAD 9.2 дає змогу досліджувати електромагнітні процеси та оцінювати їхній вплив на точність визначення спожитої електричної енергії з урахуванням спотворення синусоїдальної форми струму та напруги в контактній мережі, залежності параметрів електричної схеми від частоти та нелінійності вольт-амперних

характеристик окремих її елементів.

4.2. Математична модель системи обліку електричної енергії на електровозах змінного струму

Сучасний контроль споживання електроенергії залізничними споживачами в системі тягового електропостачання не відповідає вимогам точності, які прийняті для енергопостачальних комплексів промислових підприємств і комунального господарства. У тяговій мережі виникає проблема так званих «умовних» втрат електроенергії. Розбіжності між показаннями лічильників на тягових підстанціях та електровозах неможливо пояснити лише втратами в контактній мережі. Одним із чинників значних «умовних» втрат є недосконалість самої системи тягового електропостачання щодо організації комерційного обліку на тягових підстанціях. Іншою причиною виступає недостатня точність вимірювальних комплексів, що фіксують витрату електроенергії на електровозах змінного струму.

Для того щоб оцінити ефективність упровадження енергозберігальних технологій, необхідно застосовувати такі засоби вимірювань, які базуються на фіксації миттєвих значень електричних величин, що характеризують роботу електровоза, з подальшим їх числовим опрацюванням. Цим вимогам відповідають прилади, побудовані на мікропроцесорних технологіях. Вони мають електронні носії пам'яті, дисплей для демонстрації результатів, можливість одночасного визначення споживання та повернення енергії, що дає змогу зменшити кількість лічильників на електровозах, обладнаних рекуперативним гальмуванням.

У системі обліку електричної енергії застосована математична модель вимірювання активної електричної потужності, побудована відповідно до нормативної та методичної бази щодо вимірювання, комерційного й

технічного обліку електроенергії й потужності. Вона відображає середнє за інтервал часу T значення швидкості перетворення енергії електромагнітного поля в інші види енергії, зокрема механічну енергію руху електровоза з поїздом, незалежно від форми кривих струму та напруги:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \approx \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m u_j i_j, \quad (4.1)$$

де u_j, i_j – миттєві значення напруги та струму будь-якої форми,

а N – кількість вимірювань за часовий інтервал T , кратний періоду напруги живлення.

Під час цифрової обробки масивів миттєвих значень струму й напруги величина потужності усереднюється за кількома періодами промислової частоти. Приріст активної електроенергії протягом обраного проміжку часу визначається методом числового інтегрування активної потужності в цьому проміжку.

Через нелінійний характер навантаження електровоза форми кривих струму та напруги в контактній мережі відрізняються від синусоїдальних, що свідчить про наявність вищих гармонічних складових. У такому разі струм і напруга можуть бути представлені у вигляді ряду Фур'є. Графічно-аналітичний метод розкладання періодичних функцій довільної форми полягає в заміні визначеного інтеграла сумою скінченної кількості членів. Для цього період функції, рівний (T), поділяють на (m) рівних частин Δt , після чого інтеграли замінюють сумами. Криву напруги довільної несинусоїдальної форми можна подати через ряд Фур'є:

$$f(x) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (U'_{(n)} \sin nx + U''_{(n)} \cos nx). \quad (4.2)$$

Постійна складова визначається виразом:

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^{p=m} f_p(x) \Delta x = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^m f_p(x) \frac{2\pi}{n},$$

або

$$U_0 = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m f_p(x), \quad (4.3)$$

де $p = \overline{1, m}$ – поточний індекс; $f_p(x)$ – значення функції $f(x)$ при $x = (p - 0,5)\Delta x$, тобто в середині p -го інтервалу.

u_i – значення функції в середині i (i)-го інтервалу.

Амплітуди n -ої синусної гармоніки визначається формулами:

$$U'_{(n)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nxdx \approx 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^m f_p(x) \frac{2\pi}{m} \sin_p nx,$$

або

$$U'_{(n)} = \frac{2}{m} \sum_{p=1}^m f_p(x) \sin_p nx. \quad (4.4)$$

Амплітуди n -ої косинусної гармоніки визначаються формулами:

$$U''_{(n)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nxdx \approx 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^m f_p(x) \frac{2\pi}{m} \cos_p nx,$$

або

$$U''_{(n)} = \frac{2}{m} \sum_{p=1}^m f_p(x) \cos_p nx. \quad (4.5)$$

$\sin_p nx$ і $\cos_p nx$ – відповідні значення функцій $\sin nx$ і $\cos nx$ при $x = (p - 0,5)\Delta x$, тобто в середині p -го інтервалу.

Амплітуда кожної гармоніки обчислюється за формулою:

$$U_{(n)} = \sqrt{(U'_{(n)})^2 + (U''_{(n)})^2}. \quad (4.6)$$

Зміщення початкової фази гармоніки – тангенс кута $\psi_{(n)}$ по відношенню до початкової фази $f(x)$, знаходять як:

$$\operatorname{tg} \psi_{(n)} = \frac{U''_{(n)}}{U'_{(n)}}, \text{ звідки} \quad \psi_{(n)} = \operatorname{arctg} \left(\frac{U''_{(n)}}{U'_{(n)}} \right). \quad (4.7)$$

У моделі системи обліку електроенергії алгоритм розкладу кривих напруги та струму в ряд Фур'є реалізовано в середовищі OrCAD 9.2. Для виконання цього застосовано модель блока, зображену на рисунку 4.2, у якій використано ключі, керовані напругою (Sbreak), інтегратор (INTEG), імпульсне джерело (VPULSE), множник (MULT), блоки сумування (SUM) та віднімання (DIFF), степеневі функції (PWR), стандартні тригонометричні функції (SIN, COS, ARCTAN), операцію квадратного кореня (SQRT) та інші допоміжні елементи.

Структура моделі дає змогу сформувати постійну складову ряду, визначити амплітуди синусної та косинусної компонент k -ої гармоніки, а також амплітуди та початкові фази всіх гармонічних складових періодичного несинусоїдального сигналу струму або напруги. У першому блоці на основі ієрархічних структур реалізовано модуль НВ (Hierarchy Block), який забезпечує визначення інтеграла функції за періодом частоти мережі за

допомогою інтегратора INTEG. Розгорнута схема цього блока показана на рисунку 4.3.

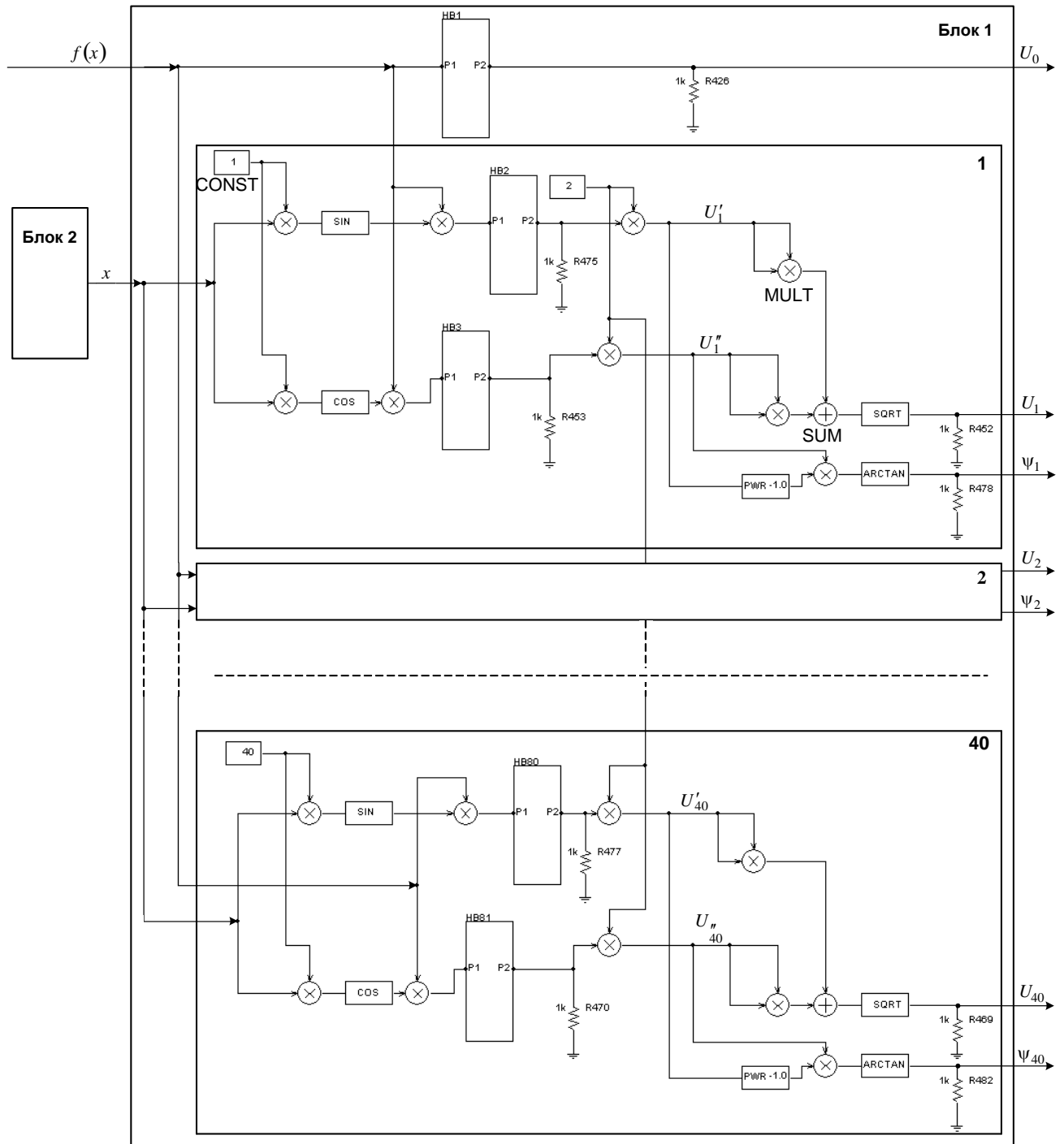


Рисунок 4.2 – Схема моделі блоку реалізації алгоритму швидкого перетворення Фур'є в програмі OrCAD 9.2 (Блок 1)

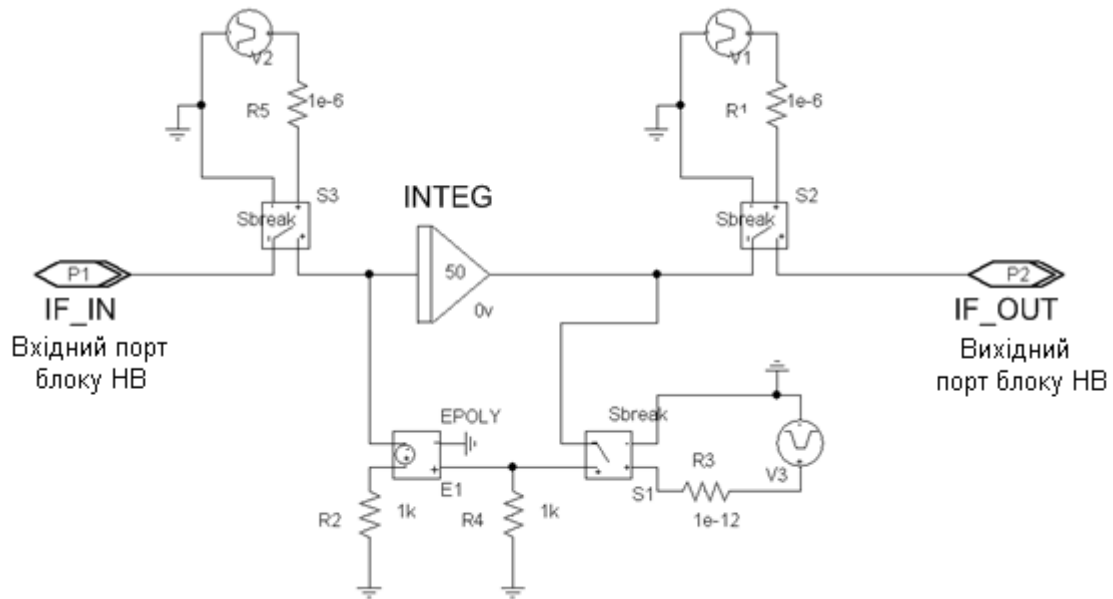


Рисунок 4.3 – Схема моделі блока реалізації способу визначення інтегралу функції за період

За допомогою керованих ключів S2 і S3, встановлених відповідно на вході та виході інтегратора, забезпечується обмеження інтервалу інтегрування. Після завершення інтегрування за один період ключ S1 разом із функцією EPOLY забезпечує скидання інтегратора до початкового стану, після чого відкривається ключ S3 і починається інтегрування за наступний період, що завершується спрацьовуванням ключа S2.

Застосування ієрархічних блоків НВ, блоків CONST з номерами гармонік від 1-ї до 40-ї, тригонометричних функцій SIN і COS та множників MULT дає змогу виконати обчислення амплітуд синусних і косинусних складових відповідно до формул (4.4) та (4.5). На виході першого блока отримуються значення постійної складової, амплітуди та початкової фази кожної гармоніки відповідно до формул (4.3), (4.6) та (4.7) з використанням множників, степеневих функцій, блоків сумування, квадратного кореня та арктангенса.

Другий блок моделі, схема якого подана на рисунку 4.4, забезпечує визначення поточного значення кута зсуву початкових фаз першої та n-ої

гармонік. Синусоїдальні джерела формують функцію тангенса цього кута, а його числове значення визначається за допомогою функції арктангенса.

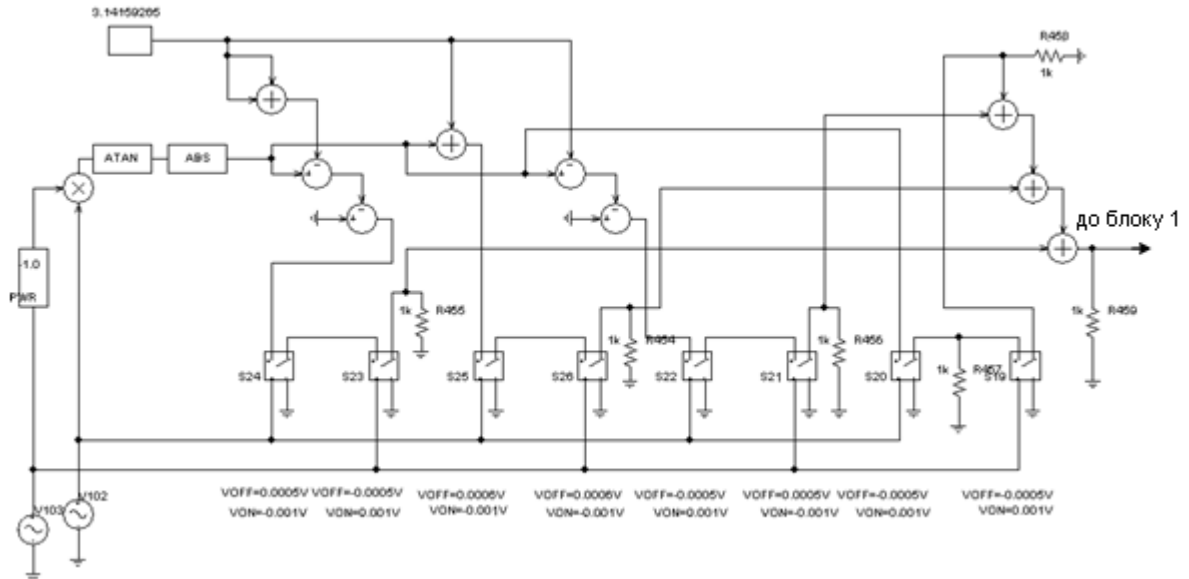


Рисунок 4.4 – Схема моделі блоку реалізації алгоритму швидкого перетворення Фур'є в програмі OrCAD 9.2 (Блок 2)

Після виконання відповідних математичних перетворень вираз (4.1) набуває такого вигляду:

$$P = P_0 + \sum_{n=1}^k P_{(n)} = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^k U_{(n)} I_{(n)} \cos \varphi_{(n)}, \quad (4.8)$$

де $P_{(n)}$ – активна потужність n -ї гармонічної складової ($n = 0 \div k$);

$U_{(n)}$ і $I_{(n)}$ – діючі значення напруги та струму для n -ї гармоніки;

$\varphi_{(n)}$ – кут зсуву фаз між напругою $U_{(n)}$ і струмом $I_{(n)}$.

Сформована математична модель електромагнітних процесів у системі «контактна мережа – електровоз», що дає можливість визначати витрати електричної енергії на електровозах змінного струму, забезпечує проведення досліджень як усталених, так і перехідних режимів роботи електрорухомого

складу. Модель обліку споживання електроенергії ґрунтується на застосуванні розкладання кривих струму та напруги у гармонійний ряд Фур'є, що підвищує достовірність результатів вимірювань.

Подана методика математичного опису динамічних перехідних процесів у силових колах електровоза, а також програмна реалізація інтегрованої моделі «контактна мережа – електровоз», використовується у навчальному процесі на кафедрі «Електротехніка, електроніка та електромеханіка» Далекосхідного державного університету шляхів сполучення.

4.3 Результати експериментальних досліджень і математичного моделювання за показниками споживання електричної енергії електровозом

Через неможливість здійснити пряме вимірювання напруги на струмоприймачі електровоза, спричинену відсутністю вимірювального трансформатора напруги на високовольтній стороні його тягового трансформатора, реєстрація напруги проводилася з обмотки збудження тягового трансформатора. Саме ця обмотка живить випрямну установку збудження (ВУВ). Такий спосіб підключення мінімізує додаткові спотворення форми напруги, оскільки в режимі тяги обмотка збудження не навантажена, на відміну від обмотки власних потреб, що працює у всіх режимах та забезпечує живленням кола напруги лічильників електроенергії.

З метою перевірки відповідності створеної узагальненої математичної моделі системи «контактна мережа – електровоз» реальним процесам було виконано моделювання тягового режиму, адекватного роботі справжнього електровоза. На кресленні Додатку Е наведено залежності напруги та струму в первинній обмотці тягового трансформатора, отримані під час

експерименту та моделювання в режимі тяги за фазового кута 110 електричних градусів на четвертій зоні регулювання.

У якості критерію порівняння електромагнітних процесів у моделі і реальному силовому колі було обрано коефіцієнт несинусоїдальності напруги, який характеризує форму періодично змінюваних сигналів. За експериментальними даними (рисунок 4.5, а) значення цього коефіцієнта дорівнювало 5,64 %, а за результатами моделювання (рисунок 4.5, б) – 6,20 %. Визначений за іншою експериментальною кривою (рисунок 4.6, а) коефіцієнт становив 5,48 %, тоді як модель дала результат 5,97 % (рисунок 4.6, б).

Отримані дані підтверджують достатній рівень відповідності показників моделювання електромагнітним процесам реального електровоза. Відносні похибки 9,1 % і 8,6 % не перевищують допустимого значення для математичного моделювання, що становить 10 %. Це свідчить про придатність представленої моделі як інструмента аналізу процесів у силових колах електровоза змінного струму.

Запропоновані інженерні рішення та створений віртуальний вимірювальний пристрій для автоматизованої системи контролю споживання електричної енергії електровозами змінного струму забезпечують безперервне визначення як витрат електроенергії, так і коефіцієнта несинусоїдальності напруги без застосування проміжних вузлів обробки сигналу, що усуває вплив людського чинника.

Порівняння даних системи із записами у маршрутному листі машиніста показало, що відносна похибка вимірювання становить 8,5 %. Отже, результати експерименту підтверджують відповідність процесів у моделі реальним електромагнітним явищам у силових колах електровоза, що засвідчує можливість використання розробленої моделі для дослідження роботи електровоза у різних режимах.

ВИСНОВОК

В результаті проведеного дослідження досягнуто мету кваліфікаційної роботи – створення та впровадження автоматизованої системи обліку споживання електроенергії на електровозах змінного струму.

Запропонована методика визначення витрат електричної енергії, що базується на фіксації миттєвих значень напруги та струму з подальшим застосуванням алгоритму швидкого перетворення Фур'є в часовому інтервалі, кратному періоду напруги живлення, дає змогу на підставі гармонійних складових оцінювати споживання електроенергії та встановлювати рівень спотворення синусоїдальної форми напруги.

Створена математична модель підсистеми обліку електроенергії, яка є частиною узагальненої математичної моделі комплексу «контактна мережа – електровоз», а також розроблений алгоритм реалізації процесів її функціонування забезпечують можливість визначити реальні витрати електроенергії, яку електровози споживають під час тяги поїздів.

Таким чином, підвищується точність обліку витрати електроенергії, розвантажуються обов'язки машиніста рухомого складу та підвищується обробка даних.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Офіційний сайт «ПрАТ Укрзалізниця» Технічна і соціальна політика. Режим доступу: https://uz.gov.ua/about/technical_and_social_policy/repair_docs/
2. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – Ч. 1. – 280 с.
3. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – Ч. 2. – 204 с.
4. Транспортні системи електромеханічних комплексів: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.В. Зайченко, В.А. Побігайло, В.Г. Дубовик (1 файл: Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 136 с.
5. Корнійчук, М. П. Технологія галузі і технічні засоби залізничного транспорту [Текст]. Ч. 1 (розділи 1-6): підручник / М. П. Корнійчук, Н. В. Липовець, Д. О. Шамрай. – 2-ге вид., випр. – К.: Дельта, 2008. – 504 с.
6. Корнійчук, М. П. Технологія галузі і технічні засоби залізничного транспорту [Текст]. Ч. 2 (розділи 7-14): підручник / М. П. Корнійчук, Н. В. Липовець, Д. О. Шамрай. – 2-ге вид., випр. – К.: Дельта, 2007. – 424 с.
7. Гетьман Г.К., Голік С.М.: Тягові передачі електрорухомого складу: Навчальний посібник. / Г. К. Гетьман, С. М. Голік. – Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2020.- 260 с.
8. Автоматизовані системи керування рухом поїздів на станціях: Навч. посібник./ Мойсеєнко В.І., Сотник В.О., Змій С.О., Щєбликіна О.В. – Харків: УкрДУЗТ, 2024. – 184 с.
- 9 Відомчі норми технологічного проектування пристроїв автоматики і телемеханіки на залізничному транспорті України, наказ від 17.04.2003 №

105-Ц.

10 Positive Train Control (PTC) Monitoring and Analysis of the Integrated Network (MAIN) – Phase I. U.S. Department of Transportation / DOT/FRA/ORD19/45 Final Report December 2019 14

11. Calvert, J.B. (1999-05-29). "Centralized Traffic Control". Archived from the original on 2021-04-19. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Centralized_traffic_control

12 Why Japan's Rail 11. Workers Can't Stop Pointing at Things A seemingly silly gesture is done for the sake of safety. by Allan Richarz – Atlas. March 29, 2017, <https://www.atlasobscura.com/articles/pointing-and-calling-japan-trains>

13. Overview of the Full Electronic Interlocking System / Yu Jia / Journal of Innovation and Development ISSN: 2958-4752 | Vol. 10, No. 3, 2025. 46-51p.

14 АС МПЦ. Автоматизована система мікропроцесорної централізації [Електронний ресурс] / ТОВ "Іпра-Софт". – 2016. – Режим доступу: http://www.ipra-soft.com/mpc_tr_u.html

15 Типові матеріали для проектування 121029-ТМП "Мікропроцесорна централізація Ebilock-950" ООО БОМБАРДЬЕ ТРАНСПОРТЕЙШН, 2014 Альбоми 1-6

16 Березовий М. І., Болвановська Т. В., Малашкін В. В., Боричева С. В., Берун Н. Ю. Основи проектування залізничних станцій та вузлів: приклади і задачі : навч. посіб. / Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2024. – 211 с.

17. Мойсеєнко, В. І., Курцев, М. С., Лазарєв, О. В. Технології та технічні засоби систем керування рухом поїздів. Навчальний посібник. [Текст] – Х. 2020. – 38 – 45с.

21 Мойсеєнко, В. І. Автоматизовані станційні системи керування рухом поїздів. Під загальною редакцією Мойсеєнка В.І. [Текст] / Мойсеєнко В.І., Пархоменко С.Л., Чепцов М.М., Коцюба Т.А., Харків, УкрДУЗТ, 2013. – 393С.

22 Автоматизовані системи керування рухом поїздів на станціях: Навч.

посібник./ Мойсеєнко В.І., Сотник В.О., Змій С.О., Щєбликіна О.В. – Харків: УкрДУЗТ, 2024. – 184 с

23 Railway Technology. (n.d.). EBI Lock Computer-Based Interlocking Systems. Retrieved from Alstom. (2016, February 15). Alstom-Bombardier consortium awarded signalling contract for the Barcelona suburban network.

24. Офіційний сайт ПрАТ «СНВО «Імпульс» Режим доступу: https://impulse.ua/wp-content/uploads/2025/11/broshura-mpcz-u_ukr.pdf

25. Христян Є.В., Арестов О.П., Івін В.Ф., Михайлов В.С., Цап В.С. Нові заходи до зниження витрат енергії в енергетичному господарстві вагонного депо. // Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості: Матеріали IV. Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11 червня – 14 червня 2013 р.) – Д.:ДНУЖТ, 2013.С. 83-84.

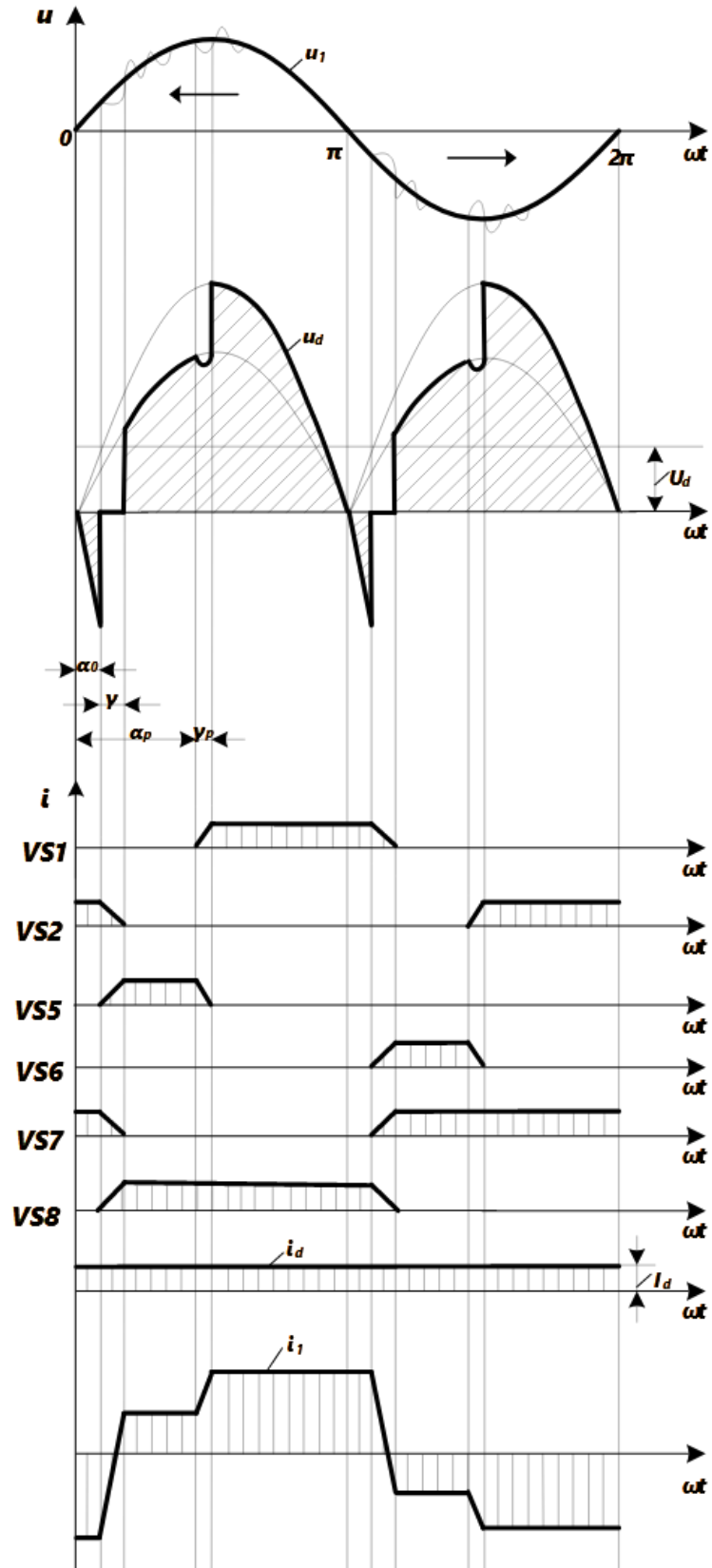
26. Концепція розвитку електричного транспорту та його систем : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 7 – 9 квітня 2020 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова та ін. ; [редкол. : М. Ф. Смирний, Н. І. Кульбашна]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 116 с.

27. Системи електропостачання електричного рухомого складу залізниць і метрополітенів [Текст] : підручник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, М. М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – 308 с.

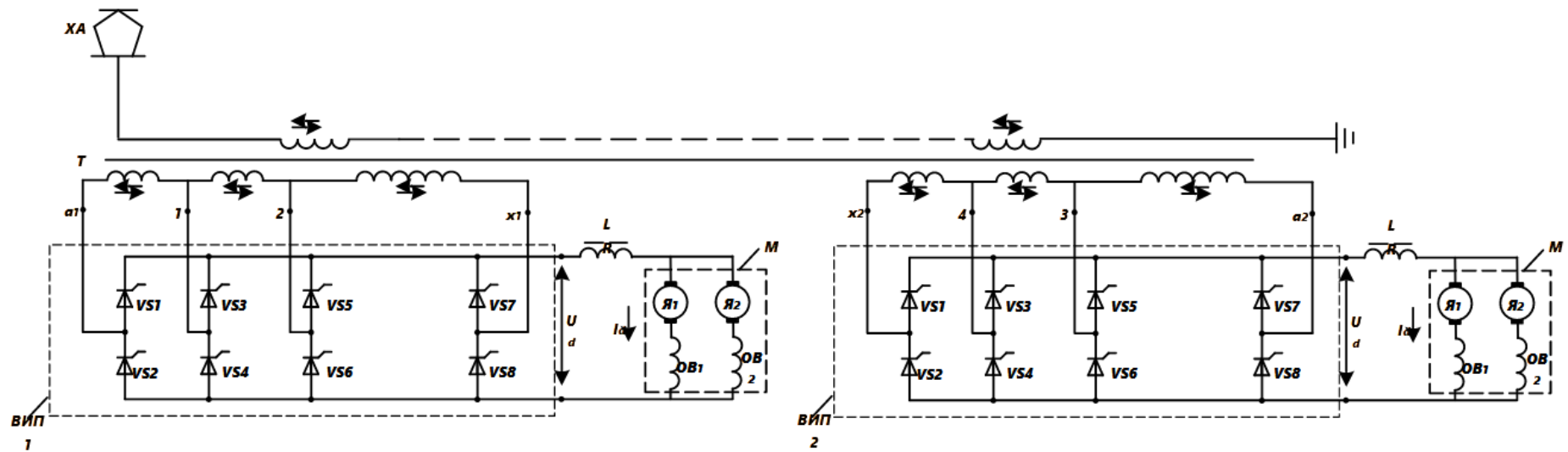
28. Сухоніс, Т.Ю. Моделювання позаштатних режимів роботи системи інвертор – асинхронний двигун тягового електротехнічного комплексу двосистемного електровоза / Т.Ю. Сухоніс, Ю.О. Миколаєнко, О.В. Бялобржеський // Гірничя електромеханіка та автоматика. – 2013. – Вип. 91. – С. 89-94.

29. Крупінський О.М. Концепція побудови верхнього рівня системи АСКОЕ в умовах реформування залізничної галузі України. // Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості: Матеріали IV. Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11 червня – 14 червня 2013 р.) – Д.:ДНУЖТ, 2013.С. 50-51.

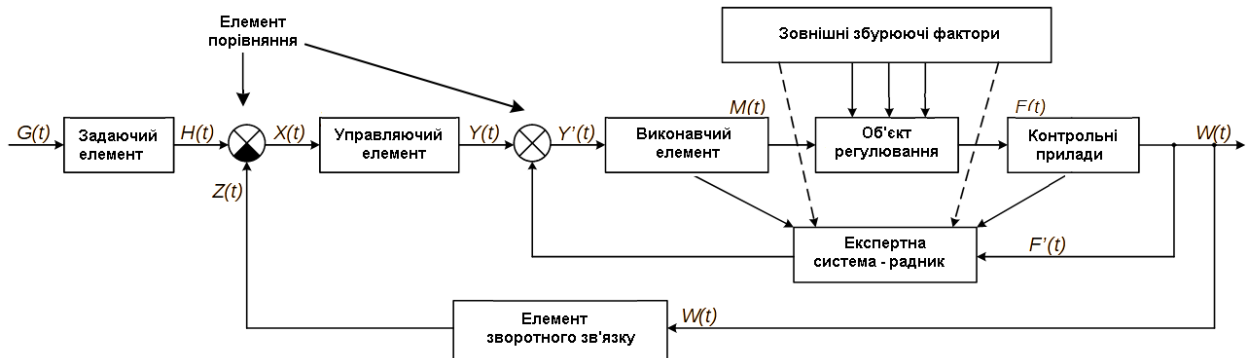
ПРОЦЕСИ РОБОТИ ВИПРЯМНО-ІНВЕРТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ
ЕЛЕКТРОВОЗУ ЗМІННОГО СТРУМУ (В 4-Й ЗОНІ РЕГУЛЮВАННЯ)



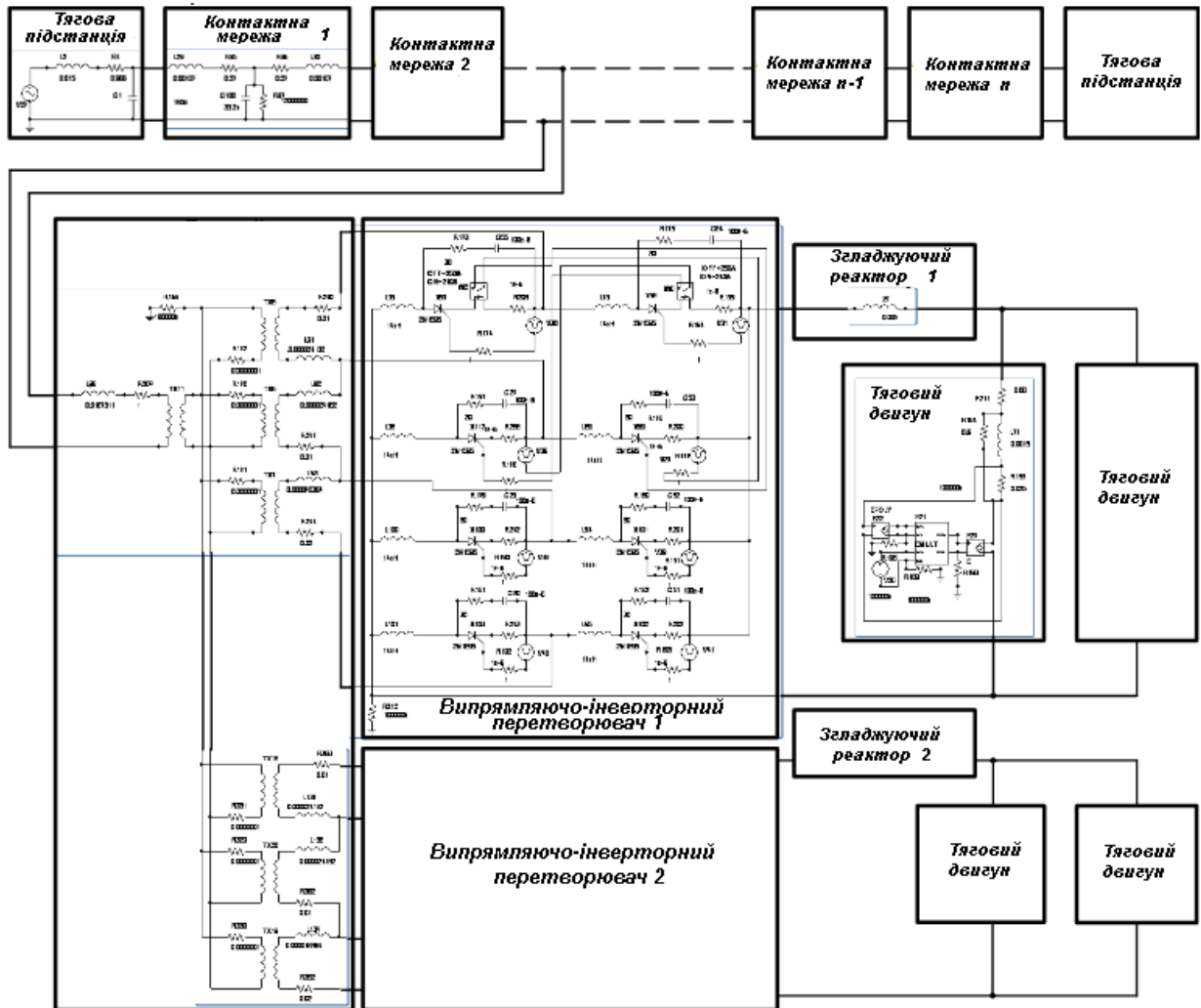
ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ З ТИРИСТОРНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМ



ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА УПРАВЛІННЯ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА
ЕЛЕКТРОРУХОМОМУ СКЛАДІ



СТРУКТУРНА СХЕМА УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ
«КОНТАКТНА МЕРЕЖА – ЕЛЕКТРОВОЗ»



ДОДАТОК Е

ГРАФІКИ НАПРУГИ І СТРУМУ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДАТЧИКІВ В РЕЗУЛЬТАТАХ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОВОЗА, ЩО ПРАЦЮЄ В РЕЖИМІ ТЯГИ НА СЕРЕДИНІ 4-ОЇ ЗОНИ РЕГУЛЮВАННЯ.

