

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

бакалаврської кваліфікаційної роботи

Підвищення експлуатаційної надійності електричного обладнання
тролейбуса

Виконав:

студент 4 курсу, групи ЕТ 2022-1

Владислав ЛЮБИВИЙ

Керівник бакалаврської роботи:

Олександр ДОНЕЦЬ

ХАРКІВ – 2026 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О.М. Бекетова

Навчально-науковий інститут Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра *Електричного транспорту*
Освітньо-кваліфікаційний рівень *Бакалавр*
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма – Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 **Микола ХВОРОСТ**

“ 16 ” червня 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Любовий Владислав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи:** *Підвищення експлуатаційної надійності електричного обладнання тролейбуса*

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи **Донець Олександр Вадимович, к.т.н., доцент**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від “22” травня 2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи
20.06.2026 р.

3. **Вихідні дані до бакалаврської роботи** Матеріали переддипломної практики, Електричні схеми та фізичні моделі електроприводу змінного та постійного струму.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)**

4.1. **Стан питання.** Виконати аналіз вимог до якості електричної енергії та електромагнітної сумісності встановленого на тролейбусі електрообладнання.

4.2. **Розробка технічного завдання.**

Виконати розробку структурної схеми діагностичного стенду з дослідження двигунів постійного струму.

4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення)



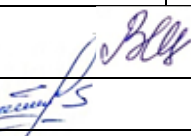

Виконати математичне обґрунтування вибору системи управління діагностикою електроприводу.

4.4. Охорона праці. Забезпечення охорони праці на законодавчому рівні.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)

Функціональна схема сучасного тролейбуса; розташування електроустаткування на даху тролейбуса; діаграми міжфазна напруга на обмотках електродвигуна тролейбуса; функціональна схема дослідницького стенду електроприводу; структури з порівнянням сигналів задання і зворотних зв'язків.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Олександр ДОНЕЦЬ, доц.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 01.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	02.05.26-07.05.26	
2.	Розробка технічного завдання	07.05.26-13.05.26	
3.	Розрахункова частина	13.05.26-20.05.26	
4.	Охорона праці	20.05.26-28.05.26	
5.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	28.05.26-10.06.26	
6.	Підготовка доповіді та презентації	12.06.26-19.06.26	

Студент


(підпис)

Владислав ЛЮБИВИЙ
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Олександр ДОНЕЦЬ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано підвищення експлуатаційної надійності електричного обладнання тролейбуса.

В роботі виконано аналіз вимог до якості електричної енергії та електромагнітної сумісності встановленого на тролейбусі електрообладнання; аналіз електричних показників роботи тягового електродвигуна тролейбуса. Розглянуто побудову і роботу діагностичного стенду з дослідження двигунів постійного струму; функціональна схема дослідницького стенду електроприводу; діагностування електроприводу на холостому ході; технічне обслуговування і ремонт електронних систем рухомого складу; контроль якості електричних контактів; математичне обґрунтування вибору системи управління діагностикою електроприводу.

Склад бакалаврської роботи:

- листів розрахунково-пояснювальної записки - 56
- рисунків - 19
- таблиць - 0
- формул - 20
- Графічна частина до бакалаврської роботи складається з 10 слайдів.

ЗМІСТ

	Стор
ВСТУП.....	7
1 ВИМОГИ ДО ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ВСТАНОВЛЕНОГО НА ТРОЛЕЙБУСІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	9
1.1 Аналіз електричних показників роботи тягового електродвигуна тролейбуса.....	9
1.2 Аналіз діагностики роботи тягового електродвигуна тролейбуса.....	16
2 ПОБУДОВА І РОБОТА ДІАГНОСТИЧНОГО СТЕНДУ З ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	20
2.1 Функціональна схема дослідницького стенду електроприводу.....	20
2.2 Діагностування електроприводу на холостому ході.....	26
2.3 Робота електроприводу з навантаженням.....	27
2.4 Технічне обслуговування і ремонт електронних систем рухомого складу.....	29
2.5 Контроль якості електричних контактів.....	31
3 МАТЕМАТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДІАГНОСТИКОЮ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	34
3.1 Контроль температури та тепловий захист інтелектуальних модулів електроприводу.....	34

3.2	Структури з порівнянням сигналів задання і зворотних зв'язків.....	37
3.3	Управління електроприводом в системі з підпорядкованим струмовим контуром.....	42
4	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	46
4.1	Задачі розділу.....	46
4.2	Аналіз умов праці й виявлення небезпечних і шкідливих факторів.....	47
4.3	Розрахунок штучного освітлення.....	49
4.4	Електробезпека.....	51
	ВИСНОВКИ.....	54
	СПИСОК ПОСИЛАНЬ.....	55

ВСТУП

Моніторинг справності робочих кіл електропривода на транспорті дає змогу ефективно та своєчасно виявляти відмови, які перешкоджають реалізації основних функцій тягової системи.

Принципи побудови схем контролю мають повною мірою враховувати специфіку діагностованого обладнання. Вони повинні виключати ймовірність виникнення небезпечних режимів, не чинити деструктивного (завадового) впливу на роботу супутніх пристроїв, а також стабільно функціонувати в умовах інтенсивних електромагнітних завад.

Одним з ефективних методів моніторингу стану робочого кола є вимірювання величини струму, що протікає в ньому під час підключення до джерела постійної напруги. Вихідне коло схеми контролю забезпечує передачу інформації про поточний стан робочих кіл електропривода або слабострумного електрообладнання тролейбуса.

Найбільш ефективним підходом є раннє виявлення відмов шляхом безперервного контролю справності електричних кіл. Якщо в контрольному колі будь-яке пошкодження фіксується негайно, без залучення додаткових засобів, то для перевірки стану робочого кола при вимкненому двигуні електропривода потрібне спеціальне технічне рішення – діагностична схема контролю (ДСК).

Ось варіанти перефразування вашого тексту. У них виправлено друкарські помилки («ДБК» замість «ДСК»), усунено серйозну технічну помилку перекладу («підлогові об'єкти»), виправлено неузгодженість родів («до неї») та замінено застарілі канцеляризми більш професійними інженерними термінами.

ДСК належать до пристроїв, які безпосередньо не реалізують функцій забезпечення безпеки, проте функціонують у складі обладнання, що відповідає за безпеку руху. Найважливішою вимогою до ДСК є повна відсутність деструктивного або небезпечного впливу на апаратуру й периферійні (бортові)

об'єкти як за нормальних умов експлуатації, так і в разі виникнення будь-яких внутрішніх несправностей.

Ефективним методом контролю стану електричного кола є вимірювання його параметрів під час підключення до тестового джерела напруги або струму. Рід струму (постійний чи змінний) та характер напруги визначаються конструктивними й схемотехнічними особливостями конкретного об'єкта діагностики.

Актуальність теми обумовлена необхідністю зменшення кількості втрат електроенергії та підвищенню її надійності та автономності.

Мета: Підвищення експлуатаційної надійності електричного обладнання тролейбуса

Завдання:

- проаналізувати переваги та недоліки класичних систем живлення електротранспорту сучасного міста;
- виконати аналіз стандартних та комбінованих автономних систем електропостачання змінного та постійного струму;
- здійснити вибір високовольтної схеми транзисторних перетворювачів, із забезпеченням електроенергетичної та електромагнітної сумісності;
- запропонувати заходи з питань охорони праці на підприємстві.

Апробація: Любимий В. С., Довгаль А. С. Удосконалення системи безперебійного електроживлення для комп'ютерного обладнання ХІХ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ «СТАЛИЙ РОЗВИТОК МІСТ: ПОСТВОЄННИЙ ПЕРІОД»
18 квітня 2026 р м. Харків.

1 ВИМОГИ ДО ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ВСТАНОВЛЕНОГО НА ТРОЛЕЙБУСІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

1.1 Аналіз електричних показників роботи тягового електродвигуна тролейбуса

У процесі еволюції систем керування тяговими електродвигунами застарілу реостатно-контакторну систему постійного струму спочатку було замінено на тиристорно-імпульсну (ТІСУ), а на сучасному етапі провідні виробники випускають троллейбуси із системами керування на базі силових IGBT-транзисторів.

Сучасний рухомий склад електротранспорту має суттєві конструктивні та технологічні переваги порівняно з попередніми поколіннями. Зокрема, збільшено потужність тягових двигунів, реалізовано ефективне електродинамічне (рекуперативно-реостатне) гальмування, інтегровано протибуксувальні та антиблокувальні системи (ABS, TCS), а також впроваджено бортовий комп'ютер для комплексного моніторингу й керування функціонуванням тягового електропривода.

Тролейбуси оснащуються супутниковими системами навігації та моніторингу GPS/GNSS, а для пасажирів забезпечується безпроводний доступ до мережі Інтернет. Такий рівень оснащення сучасного рухомого складу підвищує вимоги до якості електричної енергії та зумовлює необхідність суворого врахування факторів електромагнітної сумісності (ЕМС) всього встановленого на борту обладнання.

Удосконалення заходів із технічного обслуговування (ТО) безпосередньо пов'язане із впровадженням нових інструментальних методів діагностики, що дозволяють підвищити показники надійності та безвідмовності апаратури. Зокрема, для оцінки поточного технічного стану електрообладнання під час випробувань ефективно застосовується метод інфрачервоної термографії,

регламентований нормативним документом «Обсяг та норми випробувань електрообладнання».

Попри наявність тепловізійної техніки на багатьох підприємствах, її потенціал рідко використовується для діагностики під час технічного обслуговування. Така ситуація зумовлена необхідністю додаткових витрат на навчання та підвищення кваліфікації персоналу, а також браком спеціалізованих методик та алгоритмів діагностування конкретних типів обладнання.

Водночас задля підвищення мобільності та автономності сучасного міського електротранспорту (зокрема, для об'їзду дорожніх заторів, перешкод чи проїзду знеструмлених ділянок і залізничних переїздів) впроваджуються гібридні силові приводи. Вони проектуються з використанням систем автономного ходу на базі тягових акумуляторних батарей, дизель-генераторних установок або суперконденсаторних (ємнісних) накопичувачів енергії.

Повітряна контактна мережа міського електротранспорту поділена на окремі секції, які з'єднуються між собою секційними ізоляторами та перемичками. Під час проходження струмоприймачами тролейбуса місць секціонування або стрілочних вузлів бортове обладнання на деякий час залишається без енергоживлення.

Це зумовлює різкі коливання навантаження та нестабільність роботи силових кіл через виникнення значних динамічних перехідних процесів у системі. Задля підвищення стабільності функціонування електрообладнання та компенсації короткочасних провалів чи аварійної втрати напруги ефективно використовуються буферні накопичувачі на базі суперконденсаторів (Holyszko та ін., 2021).

На сучасному етапі у світі спостерігається стійка тенденція до розвитку екологічно чистого електротранспорту, що продиктовано прагненням мінімізувати викиди парникових газів в атмосферу. Зокрема, успіхи провідних світових виробників, таких як компанія Tesla, у сфері вдосконалення енергетичних і

динамічних характеристик електромобілів підтверджують перспективність та невідворотність масштабного переходу на електричні засоби транспорту в найближчому майбутньому.

Зокрема, на тягові акумуляторні батареї електромобілів моделі Model Y виробник надає гарантію терміном 8 років (або 200 000 км пробігу) [3].

Це суттєво підвищує споживчу привабливість такого транспорту, оскільки гарантує покупцеві тривалий ресурс експлуатації накопичувачів енергії.

З іншого боку, чинна система технічного обслуговування тролейбусів передбачає розгалужений перелік діагностичних операцій. Проте на практиці визначальним чинником для проведення ремонту все ще залишається факт безпосередньої відмови або виходу обладнання з ладу (так зване обслуговування «за станом» або «після відмови»). Така стратегія зумовлює гостру необхідність розробки та впровадження нових методів випереджальної інструментальної діагностики задля забезпечення довговічної й безперебійної експлуатації тролейбусного парку.

Основними нормативними документами в електроенергетичній галузі України, які регламентують гармонічний склад напруги та струму в системах електропостачання загального призначення та промислових підприємств, є державні стандарти з якості електричної енергії та електромагнітної сумісності (ЕМС).

Одним із ключових критеріїв, що визначають рівень спотворення синусоїдальності напруги, є коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги (або сумарний коефіцієнт гармонічних складових напруги).

Оскільки в електроенергетичній галузі (зокрема в системах міського електротранспорту) широко застосовується закордонне електрообладнання, для забезпечення його безпечної та надійної експлуатації оцінку параметрів напруги, відхилення частоти, ступеня синусоїдальності та її гармонічного складу доцільно проводити відповідно до вимог європейського стандарту EN 50160.

Відповідно до стандарту IEEE Std 519-2022 (США) для напруги до 1 кВ встановлено максимальну межу сумарного значення гармонійних складових напруги $THD(U) = 8\%$. У процесі визначення електричних параметрів роботи електродвигуна застосовуються аналізатор якості електричної енергії Power Master MI2892 та тепловізор Fluke Ti400 для отримання термограм контактних з'єднань та кабельних трас.

Перед виїздом на маршрут увесь рухомий склад тролейбусного парку щоденно підлягає обов'язковому контрольно-технічному огляду, який виконує бригада слюсарів з ремонту рухомого складу. Поглиблене технічне обслуговування першого рівня (ТО-1) проводиться з періодичністю один раз на тиждень, а комплексне технічне обслуговування другого рівня (ТО-2) – один раз на три місяці.

До регламенту ТО-1 обов'язково входять такі види робіт:

- мийно-прибиральні та санітарно-гігієнічні операції;
- контроль величини струму витоку бортової мережі;
- інструментальна перевірка вузлів та агрегатів, які безпосередньо забезпечують безпеку руху;
- перевірка тиску повітря в шинах та регулювання кута сходження керованих коліс;
- оцінка ефективності дії робочої та стоянкової гальмівних систем;
- визначення питомого опору руху тролейбуса.

Основним призначенням ТО-2 є виявлення та запобігання несправностям шляхом своєчасного виконання комплексу контрольно-діагностичних, кріпильних, регулювальних, мастильних, очисних та інших видів робіт, спрямованих на об'єктивну оцінку технічного стану транспортних засобів.

Слід зазначити, що брак спеціалізованих методик та алгоритмів діагностики електрообладнання обмежує його технічне обслуговування лише

візуальним оглядом та очищенням доступних елементів. Упровадження сучасних діагностичних приладів і засобів неруйнівного контролю сприяє оптимізації процесів пошуку прихованих несправностей в електротехнічних пристроях та бортових кабельних трасах рухомого складу. Застосування методів кількісної термографії пов'язане з необхідністю виявлення дефектів обладнання на ранній стадії їхнього розвитку в робочому режимі експлуатації, що дозволяє уникнути аварійних ситуацій, що призводять до значних економічних втрат [4].

Тепловізор застосовується для оцінки теплового стану контактних з'єднань та кабельних трас безпосередньо у процесі роботи та експлуатації.

Тепловізійна діагностика може виступати як самостійний метод технічної діагностики, що вимагає досить високої кваліфікації оператора та експерта.

Однак, як показує практика, найбільш ефективними є комплексні випробування, у процесі яких досліджується сукупність діагностичних параметрів, що визначають фактичний технічний стан обладнання. Функціональну схему такої діагностичної процедури наведено на рисунку 1.1.

Електрообладнання тролейбуса можна умовно поділити на дві основні групи: головне (силове), що забезпечує функціонування тягового електропривода, та допоміжне – призначене для живлення супутніх систем (джерел низьковольтного живлення, систем опалення й освітлення, внутрішньої та зовнішньої сигналізації, а також приводів компресора та гідронасоса рульового керування тощо).

З наведеної схеми випливає, що комплекс електрообладнання тролейбуса містить високовольтні пристрої з номінальною напругою 550 В постійного струму та 380 В змінного струму, а також низьковольтні апарати з напругою живлення 24 В постійного струму.

Тяговий електродвигун розміщений за задньою ведучою віссю тролейбуса у спеціальному ізольованому відсіку з лівого боку рисунок 1.2.

Основну частину тягового комплексу електрообладнання винесено на дах тролейбуса, тоді як решта комутаційної та допоміжної апаратури розташовується в технічному відсіку в задній частині кузова.

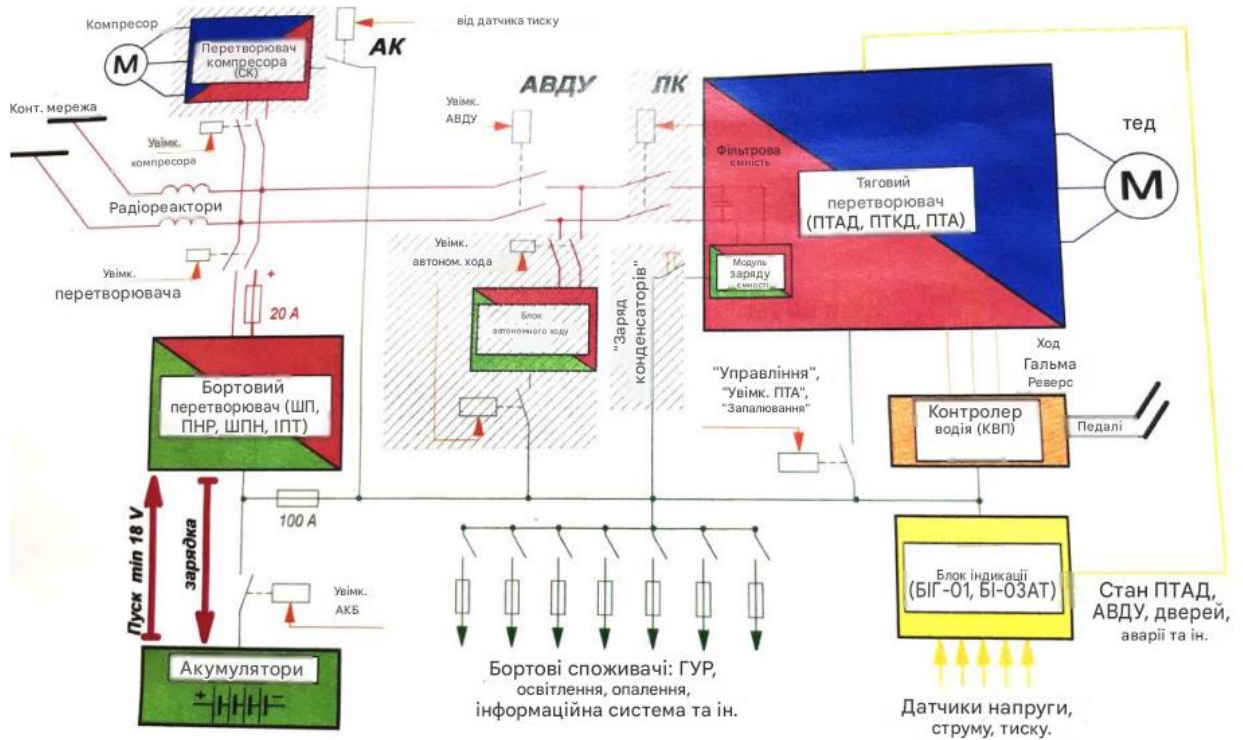


Рисунок 1.1 – Функціональна схема сучасного тролейбуса: ПТАД – перетворювач тяговий асинхронного двигуна; ТЕД – тяговий електродвигун; АВДУ – автоматичний вимикач дистанційного керування

Як джерело живлення низьковольтних ланцюгів використано статичний напівпровідниковий перетворювач (статичний перетворювач власних потреб). Він змонтований у даховому контейнері й працює паралельно з малообслуговуваною (або герметизованою) акумуляторною батареєю, розташованою в задньому технічному відсіку тролейбуса.

У конструкції транспортного засобу застосовано асинхронний тяговий електродвигун, транзисторний тяговий перетворювач (інвертор), швидкодіючий автоматичний вимикач із дистанційним приводом, пристрій контролю ізоляції (ПКІ), реєстратор (лічильник) споживаної електроенергії,

головний перемикач (ключ) пуску системи, аварійний вимикач, а також електронні маршрутні показчики.

Додатково реалізовано функцію блокування ходу тролейбуса при відхиленні (сходженні) струмоприймачів або за наявності витoku струму.

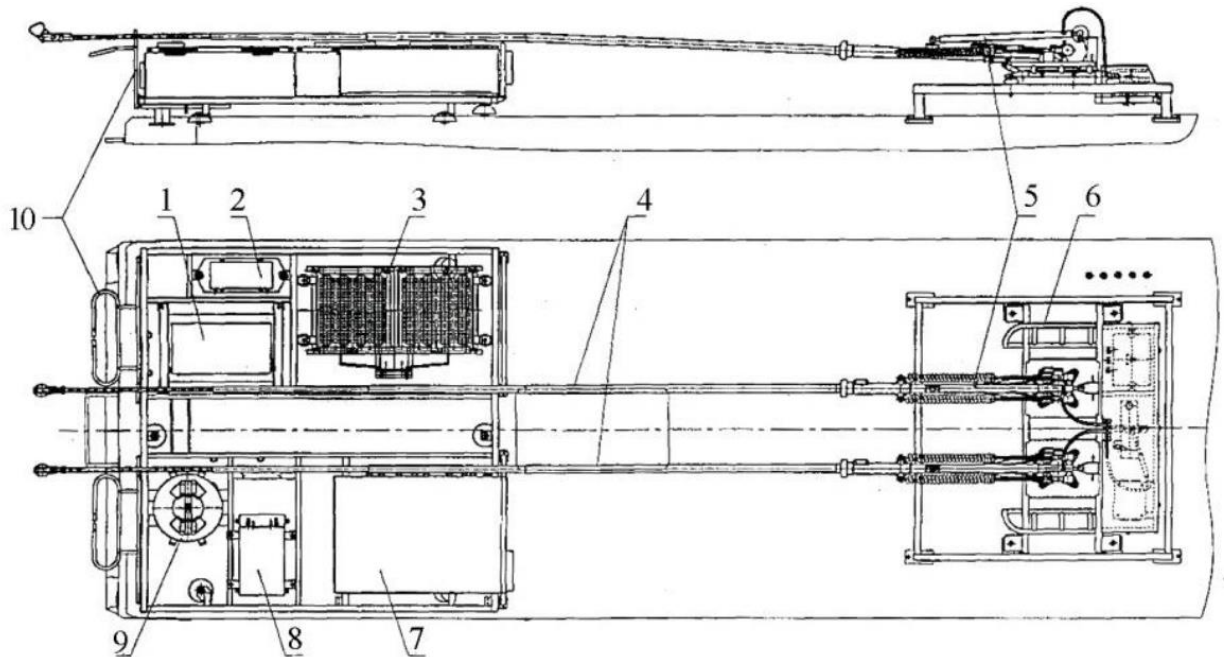


Рисунок 1.2 – Розташування електроустаткування на даху тролейбуса:

- 1 – статичний перетворювач; 2 – демпфер статичного перетворювача;
- 3 – гальмівні резистори; 4 – струмоприймачі; 5 - гідравлічний штангоуловлювач; 6 – обмежувач струмоприймачів; 7 – тяговий перетворювач; 8 – швидкодіючий вимикач; 9 - реактор перешкододавлення;
- 10 – обмежувач ходу штанг

Постійний електричний струм із номінальною напругою 550 В надходить із контактної мережі до тягового перетворювача частоти (ПТАД). Обмотки тягового асинхронного електродвигуна підключені за схемою «зірка». Для реєстрації параметрів у хвостовій частині тролейбуса (безпосередньо в зоні контактних з'єднань) закріплено гнучкі струмовимірювальні кліщі А 1227 аналізатора якості електричної енергії Metrel Power Master.

Під час проведення випробувань задній (ведучий) міст тролейбуса вивіщується за допомогою домкратів для імітації режимів руху транспортного засобу. Водій з робочого місця натискає на пускову педаль (педаль ходу), внаслідок чого напруга на обмотках електродвигуна зростає, а колеса розкручуються. Для відтворення режиму уповільнення водій відпускає пускову педаль і натискає на гальмівну педаль, що забезпечує сповільнення обертання коліс до повної зупинки.

1.2 Аналіз діагностики роботи тягового електродвигуна тролейбуса

Миттєва зміна міжфазної напруги на обмотках тягового електродвигуна з часом представлена на рисунку 1.3.

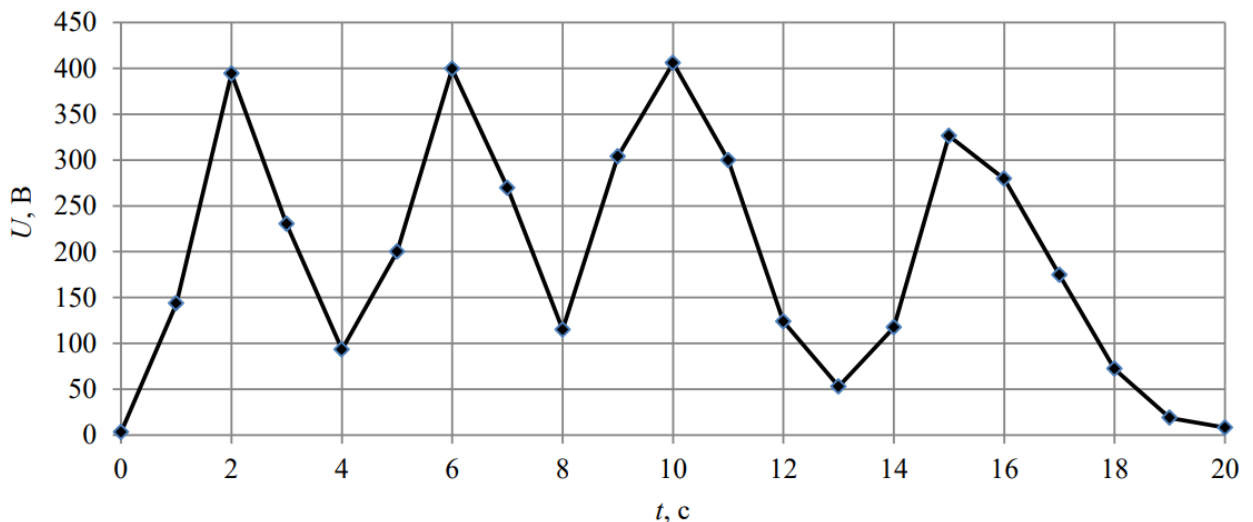


Рисунок 1.3 – Міжфазна напруга на обмотках електродвигуна тролейбуса

При натисканні педалі ходу амплітуда напруги на обмотках двигуна збільшується до 300–400 В, а в режимі гальмування – падає до 50–100 В. На діаграмі чітко простежуються чотири послідовні цикли зміни потужності сумарною тривалістю 20 с.

Форму фазних напруг у момент часу $t = 11$ с показано на рисунку 1.4. Візуальний аналіз кривих підтверджує, що миттєва напруга має близьку до синусоїдальної форму з незначними комутаційними спотвореннями.

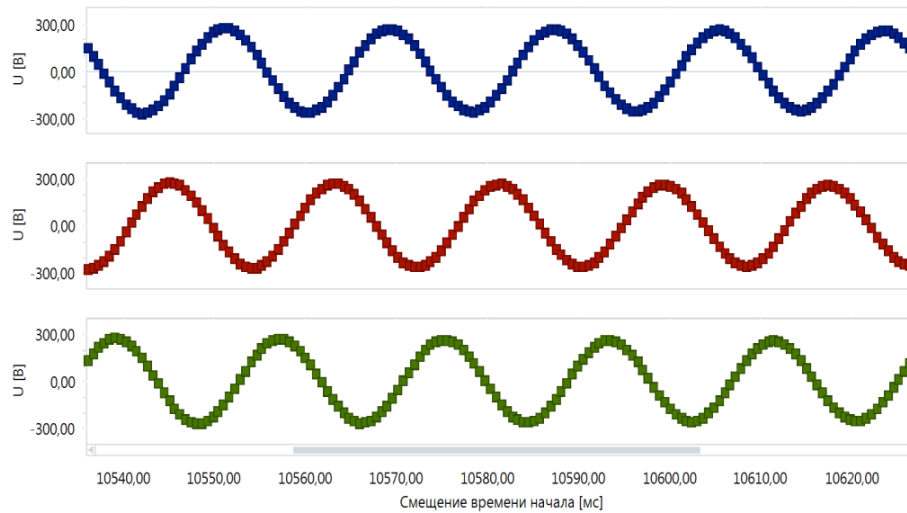


Рисунок 1.4 – Форма сигналу напруги на момент часу $t = 11$ с

На графіці рисунок 1.5, показано криву значень сумарного коефіцієнта гармонійних складових напруги $THD(U)$ у різні моменти проведення вимірювань. Коефіцієнт розраховується як відношення середньоквадратичного значення гармонійних підгруп до середньоквадратичного значення підгрупи, пов'язаної з основною гармонікою:

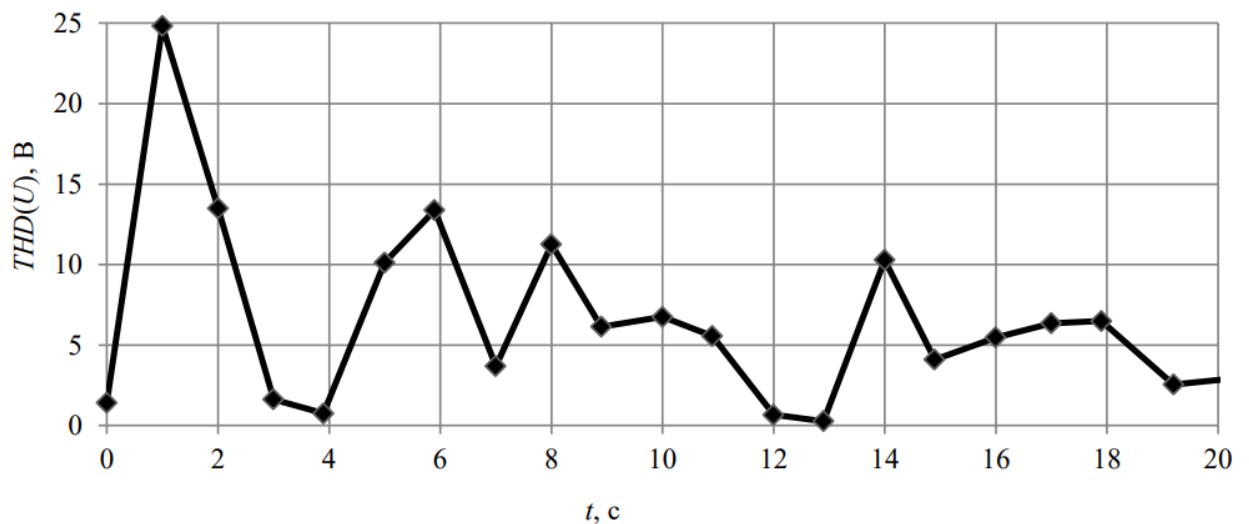


Рисунок 1.5 – Сумарний коефіцієнт гармонійних складових напруги

Як видно з наведеної діаграми, у режимі пуску тягового електродвигуна зафіксовано максимальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності напруги $THDU = 25\%$, що становить близько 6% від амплітудного (миттєвого)

значення напруги в цей момент. Надалі величина THDU стабілізується й знижується до рівня 11dots14%.

Суттєве зростання коефіцієнта THDU на початковому етапі досліджень зумовлене різким накидом (набором) потужності, що перевищує показники наступних циклів. Це припущення повністю підтверджується характером кривих на рисунку 1.6: на графіку зміни сили струму (фаза А) чітко простежується пікове значення струму протягом перших трьох вимірювань.

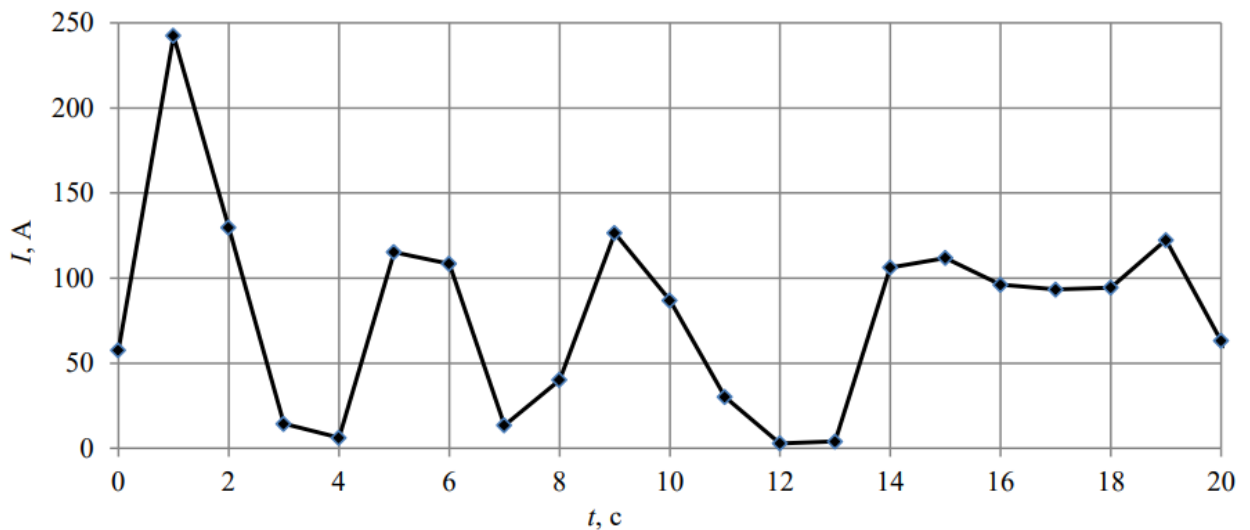


Рисунок 1.6 – Залежність сили струму від часу (фаза А)

Для аналізу електричних показників роботи асинхронного двигуна розраховані аналогічно розрахунку за співвідношенням для визначення THD(U) дані сумарного коефіцієнта гармонійних складових струму рисунок 1.7. Значення THD(I) досягають 12 % від значення струму, що є небезпечним показником для дуже чутливого релейного захисту та автоматики. Слід звернути увагу на те, що, незважаючи на зміну сили струму з 250 до 100 А (1–5 з випробувань), гармонійні складові струму не зменшилися.

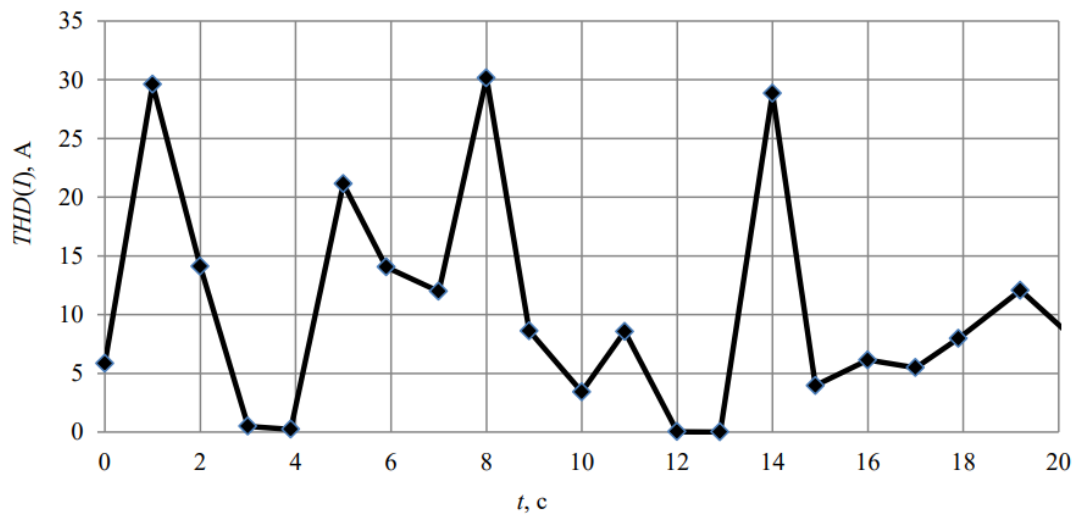


Рисунок 1.7 – Зміна сумарного коефіцієнта гармонійних складових струму з часом

Короточасні та епізодичні сплески сили струму призводять до зростання теплових градієнтів, а також інтенсивного нагрівання ізоляції провідників і контактних з'єднань. У сучасних умовах питання діагностики електрообладнання набувають особливої значущості через ускладнення логістики та постачання імпортованих комплектуючих і елементів силової електроніки.

Наявний регламент робіт під час ТО-1 та ТО-2 є недостатнім, оскільки він не охоплює повноцінних заходів із превентивного контролю технічного стану електрообладнання.

Продовження життєвого циклу наявних пристроїв та апаратів досягається шляхом модернізації системи технічного обслуговування, де доцільно впроваджувати нові інструментальні методи неруйнівного контролю із застосуванням аналізаторів якості електричної енергії, тепловізійної техніки, а також сучасних способів оцінки деградації ізоляції бортової кабельної мережі.

2 ПОБУДОВА І РОБОТА ДІАГНОСТИЧНОГО СТЕНДУ З ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Функціональна схема дослідницького стенду електроприводу

Керування швидкістю електроприводу в бік зменшення від номінальної реалізується зміною напруги якоря за сталого значення напруги збудження. За такого підходу крутний момент на валу двигуна залишається незмінним [5].

Функціональну схему цього електроприводу зображено на рисунку 2.1.

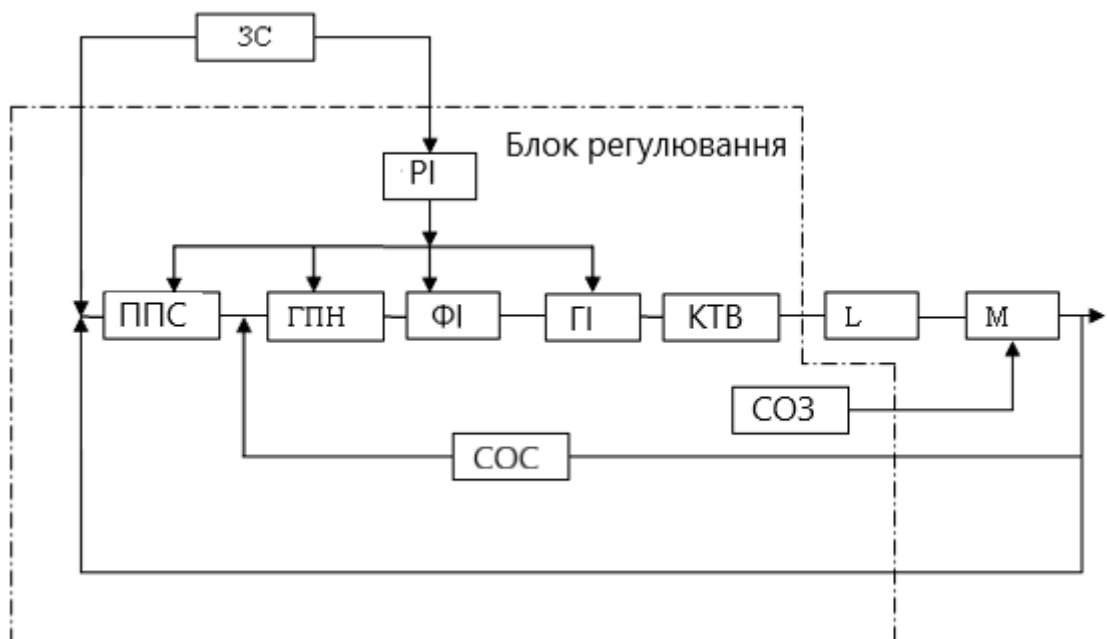


Рисунок 2. 1 – Функціональна схема дослідницького стенду електроприводу

Основні елементи блок схеми складаються з блока регулювання, датчика сигналу (ЗС), реактора (L), двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) М.

Блок регулювання складається з керованого тиристорного випрямляча (КТВ), підсилювача постійного струму (ППС), генератора пилкоподібної напруги (ГПН), формувача імпульсів (ФІ), розподільника імпульсів по

тиристорам (PI) джерела живлення (ДЖ), схеми обмеження струму (СОС), стабілізатора обмотки збудження (СОЗ).

Перетворення змінної напруги на регульовану випрямлену забезпечується керованим тиристорним випрямлячем (КТВ). Він виконаний за схемою однофазного напівкерovanого моста на базі діодів V43, V44 та тиристорів V45, V46. Захист напівпровідникових елементів від комутаційних перенапруг мережі реалізовано за допомогою RC-кіл (R55, R61, C20; R56, R62, C21 та R58, R53, C25). Для захисту силової частини від струмів короткого замикання передбачені плавкі запобіжники F1 та F2.

Підсилювач постійного струму (ППС) призначений для обчислення різниці між сигналами від датчика швидкості та негативного зворотного зв'язку (що надходить із тахомоста для модифікацій ET1E1, ET1E2 або з тахогенератора для ET1T1, ET1T2), а також для подальшого підсилення цього неузгодження. ППС виконаний на базі мікросхеми А1. Ланцюг зворотного зв'язку R16, C4 формує задані динамічні характеристики електроприводу, а кола R19, C6, C5 забезпечують стійкість роботи самого підсилювача.

Генератор пилкоподібної напруги (ГПН) формує пилкоподібні імпульси з частотою $2f$, які синхронізовані з напругою живильної мережі.

Формувач імпульсів (ФІ) забезпечує генерацію прямокутних імпульсів керування тиристорними ключами.

Розподільник імпульсів забезпечує комутацію керуючих сигналів на відповідні тиристори згідно з напівперіодами мережевої напруги — тобто на ті ключі, які в поточний момент мають позитивний потенціал на аноді.

Джерело живлення призначене для енергозабезпечення ланцюгів керування та кіл задавачів швидкості.

Усі допоміжні випрямлячі виконані за двонапівперіодною схемою з нульовим виводом (трансформатор із середньою точкою). Випрямний вузол із фільтром, підключений до напівобмотки трансформатора T1 і побудований на діодах V11, V12, резисторі R27, стабілітронах V8, V9, V13, V14 та конденсаторах C8, C9, C11, формує чотири стабілізовані напруги: +15 В, -15

В, +10 В та -10 В. Відхилення цих напруг відносно загальної точки х1–16 не перевищує ± 2 В за низького рівня пульсацій із подвоєною частотою мережі $2f$. Зазначені рівні напруги використовуються для живлення ППС, емітерного повторювача ГПН, одноперехідного транзистора V23 та ланцюга задавачів швидкості.

Випрямляч, побудований на базі обмоток 31, 32, 33 трансформатора Т1 та діодів V17, V18, забезпечує синхронізацію ЦПК із подвоєною частотою мережі $2f_{мер}$.

Випрямний вузол із фільтром, що використовує ті самі обмотки трансформатора Т1, діоди V17, V18, V22 та конденсатор С14, формує напругу 20 В відносно контакту 23. Цей номінал призначений для живлення транзисторів V26 і V27 розподільника імпульсів.

Допоміжний випрямляч із фільтром, зібраний на аналогічних обмотках трансформатора, діодах V19, V20 та конденсаторі С13, генерує напругу 20 В відносно контакту 23. Цей канал забезпечує енергозабезпечення транзисторів V28, V29, які входять до складу узгоджувальних трансформаторних каскадів.

Схема обмеження струму (СОС) призначена для захисту якорного ланцюга від надмірних струмових перевантажень [4].

Стабілізатор напруги обмотки збудження (СОЗ) забезпечує живлення обмотки збудження електродвигуна стабільною постійною напругою. Випрямний блок стабілізатора виконаний за однофазною мостовою схемою з одним керованим вентиляем (тиристором).

Сигнал зворотного зв'язку з обмотки збудження через згладжувальний фільтр R51, С17 надходить на підсилювач постійного струму, який реалізовано на транзисторі V35.

На цей же вхід надходить сигнал протилежної полярності від джерела опорної напруги, побудованого на діоді V38, резисторах R47, R48 та стабілітроні V36. ППС регулює зарядний струм ГПН, який реалізовано на базі транзистора V34, резисторів R43, R45 та конденсатора С18. Значення зарядного струму визначає тривалість заряду накопичувального конденсатора

C18, а отже – і момент спрацьовування генератора імпульсів, зібраного на одноперехідному транзисторі V37. У такий спосіб забезпечується фазове керування імпульсами. Блокування імпульсу в наступному напівперіоді зумовлене відсутністю напруги на стабілітроні, оскільки в цьому режимі він працює на прямій гілці своєї вольт-амперної характеристики.

Принцип дії блока регулювання базується на здатності тиристорів змінювати в широкому діапазоні середнє значення випрямленої напруги за допомогою зсуву моменту їх відмикання відносно початку позитивної напівхвилі живильної змінної напруги.

Згладжування випрямленої напруги КТВ здійснюється фільтром, який утворений індуктивністю згладжувального реактора та внутрішнім опором якоря двигуна. На вхід ППС надходять два сигнали: перший – з виходу тахомоста (для модифікацій ET1E1, ET1E2) або тахогенератора (для ET1T1, ET1T2), який пропорційний частоті обертання двигуна, а другий – від задавача швидкості. Ці напруги віднімаються одна від одної. Підсилений сигнал неузгодження визначає величину зарядного струму накопичувального конденсатора C10, який протікає через транзистор V10

Залежно від величини зарядного струму змінюється тривалість заряду конденсатора до порогового рівня спрацьовування одноперехідного транзистора V23. Це безпосередньо впливає на момент формування імпульсів і, як наслідок, призводить до зсуву моменту відмикання тиристорів. Таким чином, зміна напруги на вході підсилювача викликає відповідну зміну напруги на виводах електродвигуна.

Принципову електричну схему генератора пилкоподібної напруги (ГПН) зображено на рисунку 2.2.

Генератор формує пилкоподібну напругу з подвоєною частотою мережі $2f_{мер}$ і має автономне джерело живлення. Режим роботи транзистора V15 обраний таким чином, що більшу частину напівперіоду він залишається закритим під дією напруги, яка надходить через діоди V17, V18 у вигляді пульсацій із частотою $2f_{мер}$. Транзистор V15 відкривається лише в ті моменти

часу, коли напруга зсуву від резистора R30 перевищує амплітуду пульсуючої напруги, яка знімається з діодів V17, V18.

Оскільки заряд накопичувального конденсатора здійснюється від стабільного джерела струму (реалізованого на транзисторі V10), сформована пилкоподібна напруга характеризується високою лінійністю.

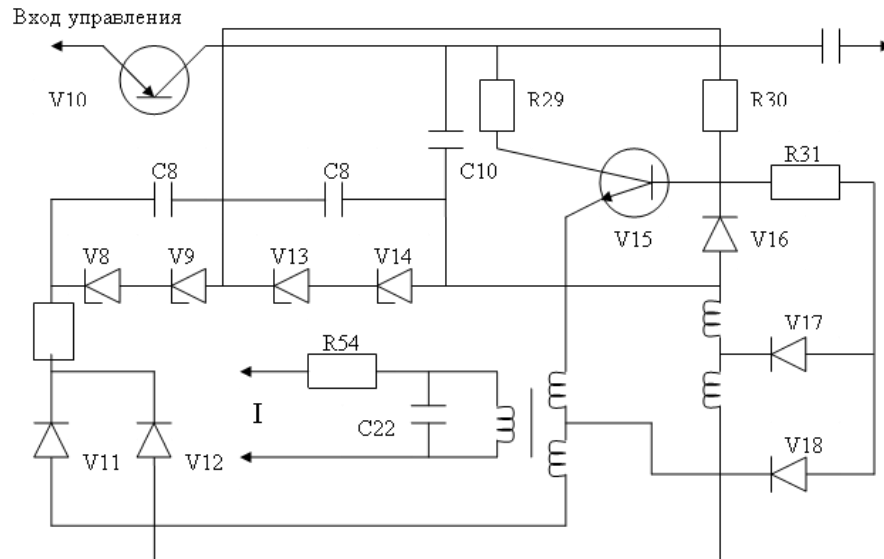


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова генератора пилоподібної напруги

Формувач імпульсів реалізовано на одноперехідному транзисторі V23, який має спадну ділянку на вольт-амперній характеристиці (ділянку негативного динамічного опору). У момент часу, коли напруга на накопичувальному конденсаторі C10 (схема ГПН) досягає порогового рівня спрацьовування транзистора V23, схема переходить у режим генерації та формує імпульс. Параметри цього імпульсу переважно визначаються характеристиками самого одноперехідного транзистора V23, параметрами джерела живлення та опором резистора R33.

Блокування другого за напівперіод імпульсу генератора забезпечується умовним підвищенням порогу спрацьовування одноперехідного транзистора. Це відбувається внаслідок заряду конденсатора C12 через транзистор V23, через що потенціал емітера V23 знижується. Відновлення вихідного стану

схеми здійснюється під час розряду конденсатора C10 через транзистор V15, а також розряду конденсатора C12 через транзистор V15 і діод V21.

Розподільник імпульсів (PI) реалізовано на транзисторах V26 і V27, які відкриваються поочередно: один комутує сигнал у перший напівперіод, інший – у наступний. Прямокутні імпульси керування тиристорами проходять по черзі через відповідний відкритий транзисторний ключ. Далі через узгоджувальні підсилювальні каскади на транзисторах V28, V29 та імпульсні трансформатори T2, T3 сигнали надходять на керуючі електроди силових тиристорів.

Згладжувальний реактор (L) містить дві обмотки: силову та компенсаційну, однойменні виводи (початки) яких з'єднані між собою. Силова обмотка реактора разом із якірною обмоткою електродвигуна утворює одне плече тахометричного моста (тахомоста). Компенсаційна обмотка підключена послідовно з резисторами R2, R3 (для електроприводів типорозміру ET1E1) або R1, R2 (для модифікації ET1E2) і входить до складу іншого плеча тахомоста.

Такий спосіб побудови тахомоста дозволяє реалізувати реверсування електродвигуна в колі якоря. Це забезпечує скорочення тривалості перехідного процесу під час реверсу та підвищує його надійність порівняно зі схемами реверсування в колі збудження.

Напруга, яка пропорційна струму якоря і необхідна для функціонування системи обмеження струму, знімається з двох зустрічно увімкнених обмоток (силової та компенсаційної). За умови рівності ЕРС у цих обмотках знята напруга буде залежати виключно від величини якірного струму [6].

Випрямлений струм КТВ характеризується значним рівнем пульсацій (змінною складовою), що може спричинити додаткове нагрівання обмотки якоря електродвигуна. Включення до схеми згладжувального реактора дозволяє мінімізувати ці втрати та повніше використовувати номінальну потужність машини.

Функцію задавача швидкості у приводах типорозмірів ET1E1 та ET1E2 виконує резистор R51, тоді як у модифікаціях ET1T1 і ET1T2 для цього передбачені резистори R53 та R57.

2.2 Діагностування електроприводу на холостому ході

Припустимо, що за допомогою задавача швидкості встановлено певну напругу завдання U_{ref} . Під час обертання електродвигуна виникає проти-ЕРС E . Вхідній напрузі ППС, яка визначається як $K \cdot E - U$ де K – коефіцієнт передачі тахомоста для модифікацій ET1E1, ET1E2 або тахогенератора для ET1T1, ET1T2), відповідає певний позитивний потенціал на виході ППС (A1) відносно загальної точки X1–16. Цей потенціал задає відповідний струм заряду накопичувального конденсатора C10 через транзистор V10, що, у свою чергу, визначає час заряду C10 до порогової напруги відкриття одноперехідного транзистора V23 у формувачі імпульсів [7].

Таким чином, відмикання тиристорів V45 і V46 здійснюватиметься у моменти часу, що відповідають заданим параметрам керування. Напруга на виході КТВ забезпечує встановлену частоту обертання електродвигуна. Стабільність роботи схеми автоматичного регулювання у сталому стані підтримується коригувальними колами. До їхнього складу входять: ланцюг R16, C4 (ПІ-регулятор), кола гнучкого зворотного зв'язку за струмом R8, C2 (для модифікацій ET1E1, ET1T1, ET1T2) або за напругою R3, C28 (для типорозміру ET1E2), фільтр тахометричного моста, а також постійні часу згладжувального реактора та електродвигуна.

Якщо змінити положення задавача швидкості у бік збільшення частоти обертання електродвигуна, то напруга завдання U_{ref} зростає. Оскільки напруга завдання подається на інвертувальний вхід ППС (A1) у вигляді негативного потенціалу, напруга на виході ППС (A1) зміщується в позитивний бік. Внаслідок цього величина зарядного струму конденсатора C10 збільшується, а тривалість його заряду до порогового рівня спрацьовування одноперехідного

транзистора V23 зменшується. Як наслідок, імпульси керування генеруються з меншим кутом запізнення (раніше, ніж у попередньому режимі), тиристори відмикаються раніше, і середня напруга на виході КТВ зростає, що призводить до розгону електродвигуна.

Зміна положення задавача швидкості у бік зменшення частоти обертання електродвигуна аналогічним чином призводить до зниження вихідної напруги КТВ, а отже – і до сповільнення двигуна.

2.3 Робота електропривода з навантаженням

У разі збільшення навантаження на валу електродвигуна зростає струм якоря, що викликає додаткове падіння напруги в якірному ланцюзі. Це призводить до зменшення проти - ЕРС E машини та, відповідно, величини сигналу зворотного зв'язку $K \cdot E$, що початково викликає зниження частоти обертання. Проте зменшення складової E за незмінної напруги завдання U призводить до зростання (за абсолютною величиною) сигналу неузгодження на вході ППС. Внаслідок цього вихідна напруга КТВ підвищується, відновлюючи частоту обертання двигуна до заданого рівня.

$$U_{ao} = K \cdot E - U, \quad (2.1)$$

а значить, як було описано вище до збільшення напруги КТВ.

Таким чином, за незмінної позиції задавача швидкості будь-яка зміна навантаження на валу електродвигуна викликає автоматичне регулювання напруги на виході КТВ. Це дозволяє компенсувати внутрішнє падіння напруги в якірному ланцюзі IR і мінімізувати коливання частоти обертання двигуна у приводах типорозмірів ET1E1 та ET1E2. У системах електроприводів типорозмірів ET1T1 і ET1T2 стабілізація швидкості відбувається аналогічно, з тією лише різницею, що вхідний сигнал підсилювача формується як різниця

між напругою завдання та напругою зворотного зв'язку, що надходить безпосередньо з тахогенератора [8].

$$U_{ao} = U_o - U_3, \quad (2.2)$$

де: U_o – сигнал з тахогенератора;

U_3 – сигнал з задатчика швидкості.

Робота електроприводу в перехідних режимах.

До перехідних режимів належать такі режими роботи, за яких відбуваються зміни частоти обертання двигуна або навантаження на його валу.

У разі швидкого зменшення швидкості або скидання навантаження на валу електродвигуна схема привода функціонує в описаному вище порядку. Проте під час інтенсивного розгону (збільшення частоти обертання) або різкого накиду навантаження в системі електропривода можуть виникнути додаткові небажані динамічні явища.

Так, наприклад, під час пуску електродвигуна в початковий момент, коли сигнал зворотного зв'язку $K \cdot E = 0$ (для модифікацій ET1E1, ET1E2) або напруга тахогенератора дорівнює нулю (для ET1T1, ET1T2), напруга завдання U досягає значної величини, що може призвести до пробоя мікросхеми A1. Крім того, за таких умов КТВ видає максимальну вихідну напругу, за якої через якірне коло електродвигуна протікає неприпустимо великий струм. Для запобігання цьому вхідне коло на базі елементів V1, V2, R12, R13, R14 забезпечує захист мікросхеми від перенапруг, а захист електродвигуна від струмових перевантажень реалізується за допомогою СОС.

Схема обмеження струму представляє з себе таку ж систему регулювання, як і основна ланцюг електроприводу з тією різницею, що вона має істотно менший коефіцієнт посилення (оскільки виключається мікросхема A1). СОТ фіксує певне значення струму якоря, залежне від потенціалу

установки знімається з резистора R20 (зазвичай фіксується струм відсічення $I_{ion} = (2-4)I_{ш}$ двигуна); інформація ж на схему відсічення надходить з обох обмоток реактора пропорційно току електродвигуна.

Схема обмеження струму (СОС) функціонує таким чином: якщо струм перевищує задане значення струму відсічки, спрацьовує схема порівняння, реалізована на транзисторі V4 та вимірювальних ланцюгах резисторів R20, R22 з одного боку і резистора R23 — з іншого. Транзистор V4 відкривається і шунтує вихід мікросхеми А1. При цьому зарядний струм накопичувального конденсатора обмежується колекторним струмом транзистора V4, що забезпечує фіксацію струму якоря на безпечному рівні. Для забезпечення стійкої роботи СОС як контуру регулювання у схему введено коригувальне коло R24, С7.

За номінального струму якоря транзистор V4 перебуває в закритому стані й не впливає на роботу електропривода.

2.4 Технічне обслуговування і ремонт електронних систем рухомого складу

У процесі експлуатації електрообладнання рухомого складу необхідно забезпечувати періодичний контроль технічного стану як усього комплексу загалом, так і його окремих вузлів та пристроїв. Такий контроль дозволяє запобігати потенційним відмовам у системі шляхом своєчасного виявлення передвідмовного стану елементів. У підсумку, належна організація технічного обслуговування суттєво підвищує надійність і безпеку роботи рухомого складу.

Особливу увагу під час технічного обслуговування електронних схем приділяють перевірці та налагодженню таких апаратів, як:

- контролер керування;
- контролер ходу;
- гальмівний контролер;

- груповий реостатний контролер (ГРК).

Під час перевірки діаграми замикання кулачкових елементів необхідно переконатися, що на жодній із позицій контролера немає елементів із неповністю замкненими або незамкненими контактами. Величина розхилу між контактами та сила контактного натискання повинні чітко відповідати технічним вимогам.

Особливу увагу слід приділяти стану робочої поверхні контактів: площа їхнього взаємного прилягання має становити не менше ніж $3/4$ від загальної ширини. Усі нарізневі (різьбові) з'єднання повинні бути щільно затягнуті. Ослаблення кріплення шпильок і рейок, що скріплюють рами групового реостатного контролера (ГРК), може призвести до порушення заданої черговості замикання кулачкових елементів. Хронометрична тривалість повного ходу групового реостатного контролера має становити 2–2,5 с. Для забезпечення нормальної роботи рекомендується виконувати у встановлений термін наступні заходи.

Періодичність та обсяг технічного обслуговування контролерів:

1. Щоденно та в період налагодження: Перевіряти правильність функціонування контролерів у складі засобів керування за показаннями контрольно-вимірювальних приладів (КВП), що фіксують перебіг регульованих технологічних процесів.

2. Щотижня: За умови експлуатації контролерів в умовах підвищеної запиленості навколишнього середовища виконувати обдування клемних колодок сухим стисненим повітрям для видалення пилу.

3. Щомісяця: Очищати клемні колодки від пилу шляхом обдування сухим повітрям. Перевіряти надійність кріплення самих контролерів, а також стан їхніх зовнішніх електричних з'єднань.

4. У період капітального ремонту основного обладнання та після його завершення: Виконувати повну перевірку технічного стану та вимірювання параметрів контролера в лабораторних умовах відповідно до

вимог інструкції з експлуатації (керівництва користувача), що входить до комплекту поставки.

2.5 Контроль якості електричних контактів

Основним параметром, що визначає довговічність і надійність електричних контактів, є електричний опір на межі поділу між двома провідними елементами з'єднання, так званий контактний опір [6].

Повний опір електричної сполуки z_{Σ} являє собою суму двох опорів: об'ємного опору металевих частин z_M й опору контакту, що існує на границі роздягнула, z_K тобто

$$z_{\Sigma} = z_M + z_K. \quad (2.3)$$

Типові значення відносини опору до опору контакту при наступних видах електричних сполук:

У контакті рознімання «штепсель-гніздо».....	3-5
У контакті рознімання друкованої плати.....	0-20
У контактах найпоширеніших реле й перемикачів	-20
У контактах спеціальних реле й перемикачів.....	0-100

Дослідженнями ряду фахівців, наприклад фахівців фірми Burndy Corporation (США), встановлена кореляція між початковим значенням z_K і довговічністю електричних сполук і розроблені методи неруйнуючого контролю їхньої якості й надійності [5].

В основу цих методів покладена різниця в часі теплових реакцій ділянок контакту й товщини металу на входження електричного струму, що виникає як результат різниці металевих мас, що утворюють контакт.

Оскільки ділянки контакту дуже мала (маса порядку 10^{-9} г), вони реагують на проходження струму за час порядку 10^{-6} с, тоді як всій масі металу потрібно близько 1с, щоб прореагувати на той же імпульс струму.

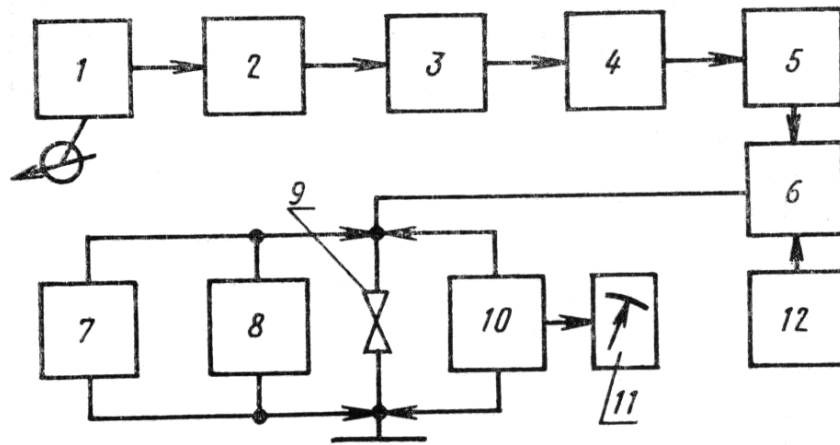


Рисунок 2.3 – Блок-схема установки для виміру опору контакту при електроімпульсному зондуванні:

1-напряга живлення; 2 пристрій, що-блокує; 3-джерело струму; 4-каскад формування імпульсу; 5-ланцюг контролю імпульсів; 6-вимикач більших струмів; 7-джерело струму зсуву; 8-ланцюг виявлення плівки; 9-досліджуваний контакт; 10-ланцюг установки нуля; 11-індикатор; 12-пристрій однократного запуску

Таким чином, імпульс струму тривалістю 1 мс чинитиме локальний тепловий вплив безпосередньо на зони фактичного контуру дотику, не спричиняючи істотного нагрівання інших елементів з'єднання. Для досягнення необхідного технологічного ефекту слід застосовувати імпульс струму достатньої потужності, здатний розігріти область контакту до температури розм'якшення металу.

$$I_{KP} \cdot z_K = K, \quad (2.4)$$

де K – величина, постійна для даного матеріалу ($K \leq 3$ для більшості матеріалів).

Це співвідношення справедливо для великих асортиментів застосовуваних контактних матеріалів.

Установка забезпечує як вимір абсолютного значення величини Z (точність 5%). так і дозволяє розсортовувати сполуки за принципом $z_K \leq z_{K, доп.}$. У цьому випадку установку доповнюють програмуємим пристроєм.

Принцип роботи розглянутого пристрою базується на періодичному пропущенні через досліджувані контакти контрольованого виробу імпульсів струму тривалістю 1 мс. Для формування імпульсів та керування процесом використовуються каскади, що відображені у верхній і правій частинах блок-схеми. Вимірювання перехідного опору контактів здійснюється каскадами, які розташовані у лівій нижній частині блок-схеми. Синхронізація роботи силовизначеної (високострумової) та вимірювальної частин приладу дозволяє виконувати як ручне, так і автоматичне сортування (розбракування) контрольованих виробів за величиною контактного опору Z_k .

Досвід застосування подібного методу контролю якості електричних з'єднань показує, що перехідний опір на межі поділу контакту безпосередньо впливає на надійність електричних з'єднувачів. Використання цих методів дозволяє не лише відбракувати дефектні контакти в процесі експлуатації рухомого складу, а й прогнозувати їхню довговічність та безвідмовність під час подальшої роботи [9].

3 МАТЕМАТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДІАГНОСТИКОЮ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

3.1 Контроль температури та тепловий захист інтелектуальних модулів електроприводу

Для контролю температури й захисту силових модулів від перегріву найчастіше використовують терморезистори з негативним (NTC) або позитивним (PTC) температурним коефіцієнтом.

Головна складність у забезпеченні надійного термозахисту полягає в тому, що виміряти миттєву температуру неможливо. Через це під час розробки захисних алгоритмів обов'язково слід урахувувати теплову інерційність системи.

Захист від теплового перевантаження забезпечується за допомогою інтегрованих інтелектуальних модулів (IPM) SKiiP виробництва компанії SEMIKRON. Конструкція цих пристроїв передбачає об'єднання силової частини, драйвера керування, а також вимірювальних датчиків струму, напруги та температури радіатора.

Функцію моніторингу теплового стану виконують вбудовані кремнієві PTC-сенсори чіп-виконання типу SKCS. Внутрішня схема драйвера трансформує змінний опір датчика в аналоговий сигнал напруги в діапазоні 0–15 В (гранична похибка вимірювання становить 3%). При досягненні температурного порогу 115 ± 5 °C електронна схема захисту ініціює вимкнення силових транзисторів модуля.

Температурний сенсор монтується безпосередньо на керамічну DBC-підкладку модуля методом паяння у безпосередній близькості до силових кристалів.

Завдяки високій теплопровідності використовуваної кераміки (на основі оксиду або нітриду алюмінію), температурний градієнт між підкладкою та радіатором є мінімальним.

Надійність функціонування системи теплового захисту суттєво залежить від просторового розташування сенсора всередині силового модуля. Точність вибору точки моніторингу набуває критичного значення у випадках, коли граничний поріг спрацьовування жорстко заданий інтегрованою в ІРМ схемою керування.

Конструкція модулів SKiiP не передбачає наявності базової плати: керамічна DBC-підкладка з кристалами встановлюється прямо на радіатор. Оскільки тепловий опір між силовими елементами та датчиком визначається його локацією, розглядають кілька варіантів компоновки (рис. 3.1):

Варіант А: розміщення сенсора безпосередньо на IGBT-кристалі;

Варіанти В і С: встановлення сенсора у різних точках DBC-підкладки;

Варіант D: фіксація сенсора на поверхні тепловідводу.

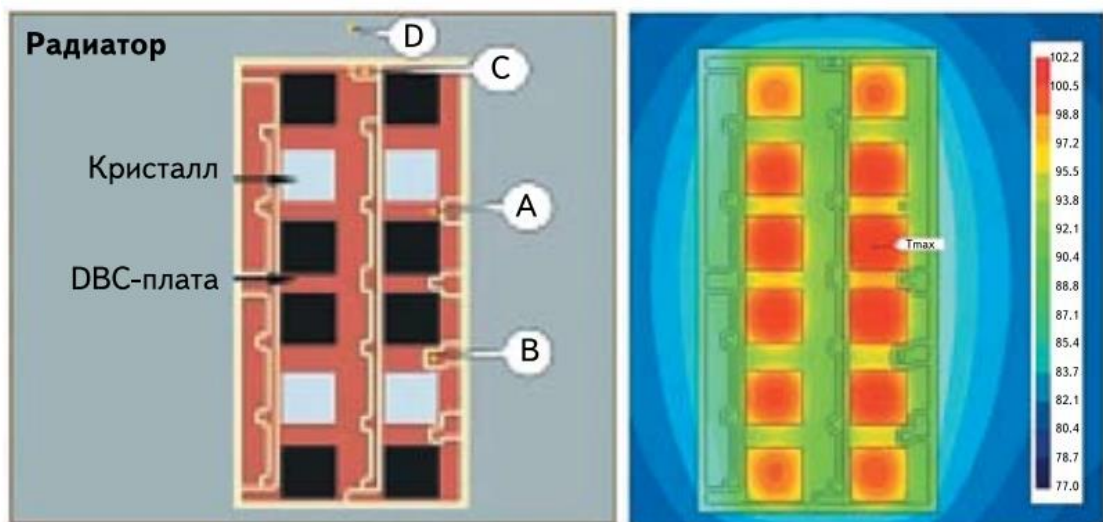


Рисунок 3.1 – Варіанти положення термодатчика всередині силового модуля, розподіл температури поверхнею DBC-плати

Значення теплового опору «кристал – датчик» $R_{th(j-r)}$, який є паспортною характеристикою модулів SKiiP, залежить від конкретного місця встановлення сенсора. За умов теплової рівноваги безпечна уставка спрацьовування термозахисту однозначно розраховується для кожної схеми розміщення [9].

організацію абсолютно надійного теплового захисту лише на основі прямого вимірювання.

Вирішенням цієї проблеми є комплексне використання сигналів від струмових і температурних сенсорів, а також побудова захисту на основі комбінованого алгоритму, який унеможливило критичні перевантаження за будь-яким із параметрів.

Таку функціональність забезпечують сучасні інтелектуальні силові модулі (IPM), що мають розширені можливості для всебічного моніторингу робочих режимів.

3.2 Структури з порівнянням сигналів задання і зворотних зв'язків

У прямому каналі керування систем такого типу передбачено лише один регулятор, на вхід якого подаються всі сигнали неузгодження між заданими та фактичними значеннями регульованих координат рисунок 3.3 [6].

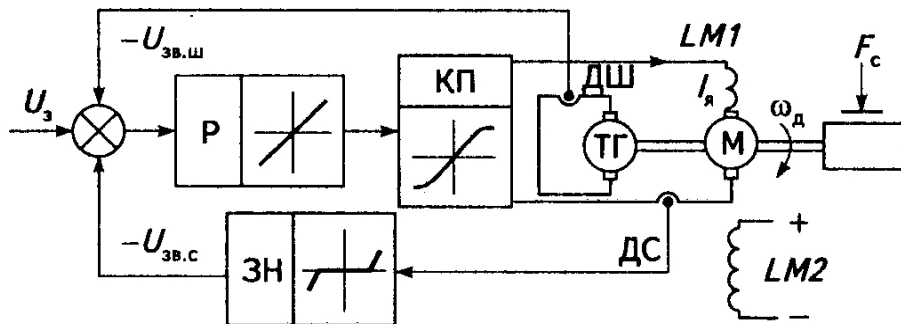


Рисунок 3.3 – Структура системи з порівнянням сигналів задання і зворотних зв'язків

Формування необхідних статичних і динамічних характеристик електропривода за системою «керований перетворювач – двигун постійного струму» (КП – ДПС) реалізується введенням від'ємного жорсткого зворотного зв'язку за швидкістю та від'ємного затриманого зворотного зв'язку за струмом якорного контуру.

Порівняння сигналів завдання та зворотних зв'язків виконується на спільному регуляторі (Р). Поточні значення швидкості та струму вимірюються відповідними датчиками (ДШ та ДС). При цьому сигнал струмового зворотного зв'язку заводиться на регулятор через ланку із зоною нечутливості (ЗН).

Електромеханічні характеристики, а також характеристику затриманого зворотного зв'язку за струмом наведено на рисунку 3.4.

$$U_{зв.с} = f(I_{я}); \quad (3.1)$$

Вказаний зв'язок вступає в дію за перевищення струмом якірного кола значення $I_{відс}$, а до цього характеристику формує (відрізок АВ) зворотний зв'язок за швидкістю (характеристика $U_{зв.с} = f(I_{я})$).

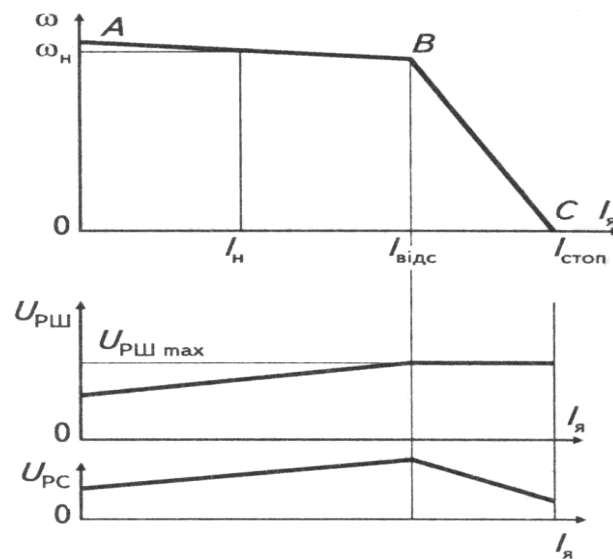


Рисунок 3.4 – Електромеханічні характеристики, характеристики затриманого зворотного зв'язку

На інтервалі АВ (де граничне значення в точці В відповідає струму відсічки $I_{відс}$) система функціонує в режимі регулювання швидкості. У разі перевищення цього порогу (на ділянці ВС) вона переходить у режим регулювання струму.

Оскільки завдання стабілізації швидкості та обмеження струму покладені на єдиний спільний регулятор, його параметри штучно оптимізуються під компромісне налаштування.

Ситуація ускладнюється тим, що траєкторія ділянки обмеження струму ВС формується під одночасним впливом від'ємних зворотних зв'язків за струмом та швидкістю, вектор її яких є взаємопротилежним.

Системи підпорядкованого регулювання (СПР). Ці системи були розроблені як альтернатива однорегуляторним структурам. Їхня особливість полягає в тому, що кожна контрольована координата керується власним окремим регулятором. Усі регулятори контурів з'єднані послідовно (каскадно).

На вході кожного з них порівнюються сигнали, пропорційні заданому та фактичному значенням відповідної координати. Вихідна величина регулятора зовнішнього контуру є завданням (уставкою) для регулятора внутрішнього контуру, а обмеження будь-якої координати реалізується шляхом лімітування сигналу її завдання.

Функціональну схему двоконтурної СПР з електроприводом КП – ДПС з регулюванням координат струму якорного кола I_a , та швидкості двигуна ω_d наведено на рисунку 3.5.

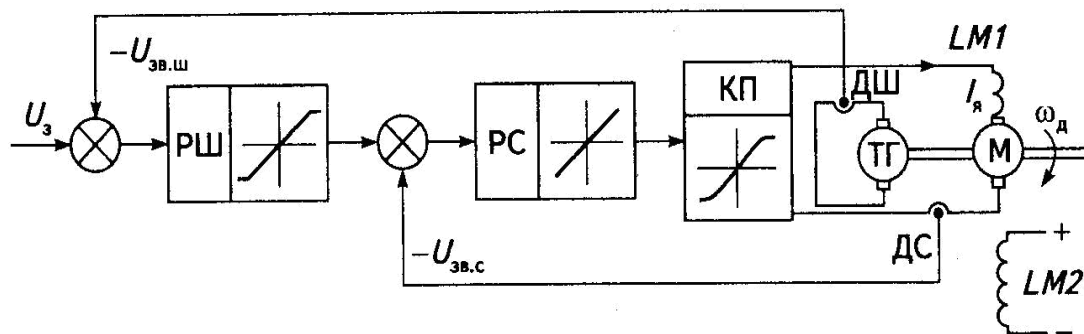


Рисунок 3.5 – Функціональну схему двоконтурної СПР з електроприводом КП – ДПС

Внутрішнім контуром регулювання тут є контур струму з регулятором РС, зовнішнім – контур швидкості з регулятором РШ. Вихідна напруга РШ обмежується значенням $U_{РШ\max}$. Оскільки вихідний сигнал РШ є задавальним для РС, то сигнал $U_{РШ\max} = U_{з.РС\max}$ визначає максимально допустимий струм двигуна $I_{я\max}$.

Електромеханічну характеристику $\omega_d(I_{я})$, а також характеристики регуляторів швидкості

$$U_{РШ} = f(U_{з.ш} - U_{зв.ш}) \quad (3.2)$$

і струму

$$U_{РС} = f(I_{я}) \quad (3.3)$$

зображено на рисунку 3.6.

Аналіз характеристик регуляторів свідчить, що ділянка стабілізації швидкості АВ формується за спільної дії контурів струму та швидкості, тоді як ділянка обмеження струму ВС визначається виключно струмовим контуром. Отже, формування інтервалу стабілізації швидкості вимагає компромісного налаштування контурів регулювання – аналогічно до того, як формується ділянка струмового обмеження в однорегуляторній структурі.

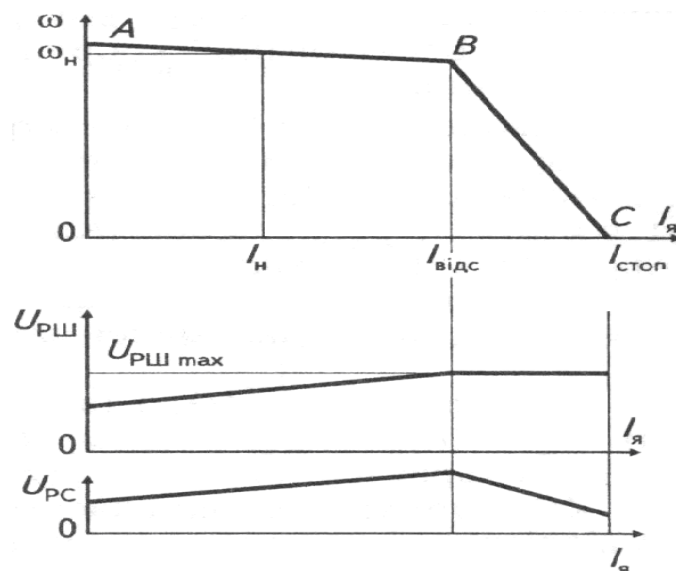


Рисунок 3.6 – Електромеханічна характеристика $\omega_d(I_{я})$, характеристики регуляторів швидкості

Проте, якщо в системах першого типу розрахунок параметрів і динамічне налаштування регулятора суттєво ускладнені й не мають чіткої інженерної методики, то для СПР розроблено стандартизований інженерний підхід. Цей підхід полягає в послідовному налаштуванні контурів на модульний або симетричний оптимум за швидкодією. Водночас через каскадне (послідовне) ввімкнення контурів загальна швидкодія системи очікувано знижується.

У системах такого типу, аналогічно до структур підпорядкованого регулювання, кількість регуляторів збігається з кількістю контрольованих координат. Проте, на відміну від СПР, тут застосовано паралельне з'єднання регуляторів, причому в кожен момент часу активним є лише один із них — той, чия координата досягла граничного значення.

Селекцію регулятора, що бере на себе керування в поточний проміжок часу, забезпечує ланка вибору режиму (ЛВР). У найпростішій конфігурації функцію ЛВР виконує логічний блок вибору мінімального сигналу.

Варіант схеми з паралельним з'єднанням регуляторів наведено на рисунку 3.7.

Схема керування складається з двох контурів – контуру швидкості з регулятором РШ та контуру струму з двома регуляторами РС1 і РС2 для двох напрямів проходження струму і ЛВР. Ланка вибору режиму пропускає сигнали керування від того регулятора, який має менше значення вихідного сигналу.

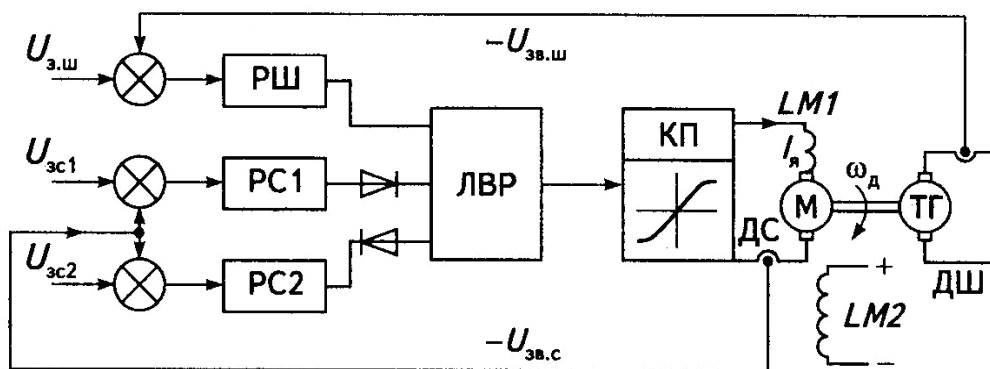


Рисунок 3.7 – Схема з паралельним з'єднанням регуляторів

Електромеханічну характеристику і відповідні вихідні сигнали регуляторів РШ і РС, які пропускає ЛВР, зображено на рисунку 3.8.

Отримані характеристики демонструють, що кожен регулятор відповідає виключно за власну ділянку статичної характеристики: регулятор швидкості (РШ) забезпечує стабілізацію частоти обертання, а регулятор струму (РС) – обмеження струму якорного кола. Водночас при формуванні динамічних характеристик система не дозволяє досягти абсолютної незалежності під час налаштування параметрів регуляторів.

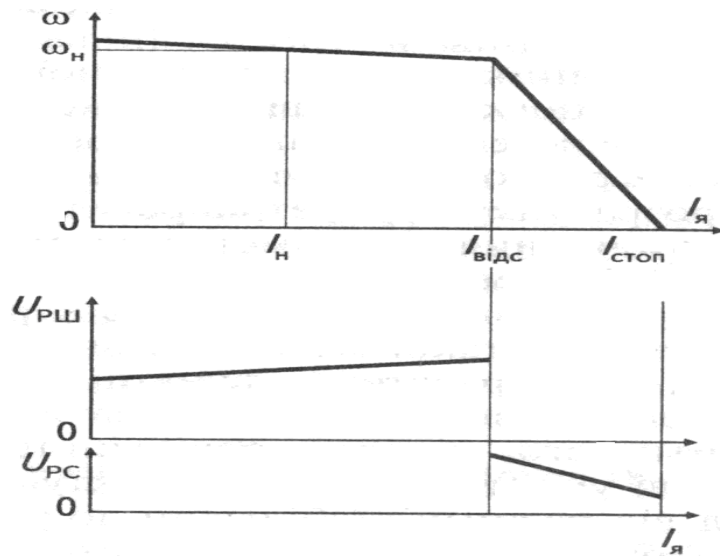


Рисунок 3.8 – Електромеханічні характеристики і вихідні сигнали регуляторів РШ і РС

В умовах динамічного навантаження системи з паралельним увімкненням регуляторів демонструють суттєво вищі показники якості регулювання порівняно з розглянутими вище структурами, що досягається завдяки вищій швидкодії контуру швидкості.

3.3 Управління електроприводом в системі з підпорядкованим струмовим контуром

Схема системи управління швидкістю двигуна на якорі при наявності підпорядкованого струмового контуру показана на рисунку 3.9.

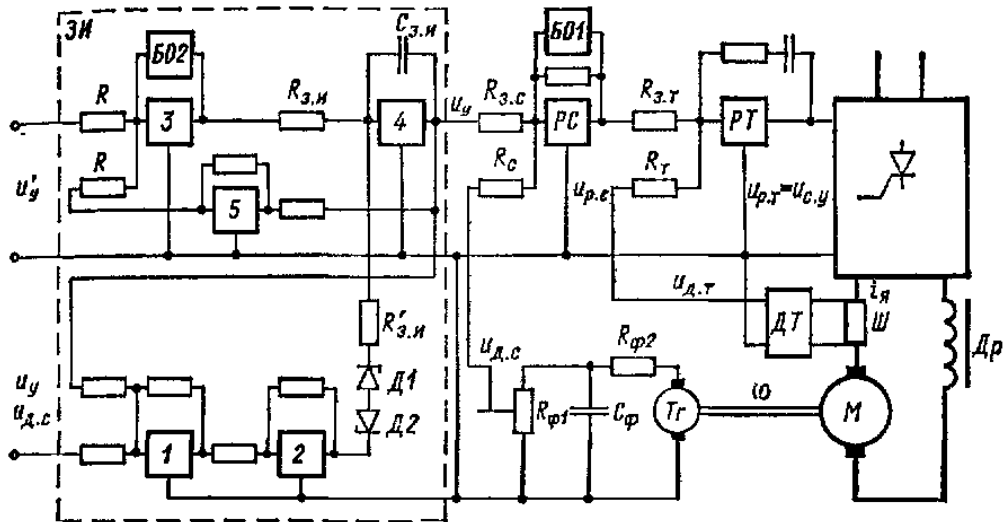


Рисунок 3.9 – Схема управління швидкістю двигуна з підпорядкованим струмовим контуром

Контур струму містить регулятор струму (РТ), на входні опори $R_{з.т}$ та $R_{з.с}$ якого подаються сигнали з виходу регулятора швидкості (РШ) зовнішнього контуру $U_{р.ш}$ та датчика струму (ДС) $U_{д.с}$.

Призначенням ДС, підключеного до шунта Ш, є перетворення струму якоря в пропорційну йому напругу, узгоджену за рівнем зі стандартними напругами елементів системи керування, а також забезпечення гальванічної розв'язки між силовим якорним колом двигуна та колами керування. Вихідна напруга РТ надходить на систему керування імпульсного перетворювача (ІП). Завдяки застосуванню блока обмеження (БО) вихідна напруга РШ не може перевищити граничного значення $U_{р.ш.огр}$, що забезпечує лімітування струму якоря на заданому рівні

У режиму пуску, припускаючи, що з датчика інтенсивності (ЗИ) немає і пуск здійснюється поданням на вхід РС напруги u_y , значення якої U_y визначає заданий рівень швидкості .

Характеристики при регулюванні ослаблення порушення досягає 0,26, а максимальна напруга на двигунах становить не менш 98% напруги мережі, що є достоїнством розробленого регулятора. Час евакуації порожнього складу із блок-дільниці довжиною 715 м становить 40,5 з, для складу з номінальною

масою вантажу 9т-42,5 з (час даний по головному вагоні без обліку довжини складу).

Під впливом великого вхідного сигналу на виході РС одразу встановлюється напруга $U_{p.c} = U_{p.c.огр} = \text{const}$ і коефіцієнт зусилля РС дорівнює нулю, тобто контур швидкості розімкнеться. Оскільки $U_{p.c}$ являється задаючим сигналом для контуру струму, струм якоря $I_{я.макс}$, більший струму, відповідно моменту навантаження $M_c = \text{const}$ це відповідає розгону двигуна з постійним прискоренням. В цей період пуску для вхідних ланцюгів регулятора струму можна записати:

$$\frac{U_{p.c.огр}}{R_{з.т}} - \frac{U_{д.т.макс}}{R_{т}} \approx 0, \quad (3.4)$$

$$U_{д. т. макс} = k_{д т} I_{я.макс} \quad (3.5)$$

де; $I_{я. макс}$ – максимально допустимий струм в перехідних режимах;
 $k_{д т}$ – передатний коефіцієнт датчика струму.

Розрахован $k_{д т}$ як відношення напруги на виході ДТ до відповідному йому значенню якірного струму.

По мірі розгону двигуна напруга тахогенератора $U_{д.с}$:

$$U_{д.с.} = k_{д с} \omega \quad (3.6)$$

зростає і, коли досягне значення, близького до визначаємого рівністю:

$$\frac{U_{у}}{R_{з.с}} - \frac{k_{д.с} \omega_{уст}}{R_{с}} \approx 0, \quad (3.7)$$

регулятор швидкості вийде з обмежень.

Внаслідок подальшого збільшення швидкості напруги і струм якоря будуть зменшуватися. Встановлений стан, до якого прийде система, буде характеризуватися значенням $U_{p.c}$, котре відповідає даному струму навантаження.

Система в будь-якому режимі обмежуватиме якірний струм граничним значенням $I_{я.макс}$, яке може бути перевищене лише в початковий момент після виходу РШ на обмеження через перехідний процес у струмовому контурі.

Завдяки динамічним властивостям контуру струму система швидко відпрацьовує збурення у вигляді коливань напруги мережі. Якщо напруга мережі змінюється стрибкоподібно, то в перший момент часу це викликає зміну ЕРС імпульсного перетворювача (ІП). Таке коливання призводить до зміни струму якоря, і лише після цього починає змінюватися швидкість двигуна.

Регулятор струму (РТ) відновлює задане значення струму шляхом впливу на ІП. За умов високої швидкодії струмового контуру попереднє значення струму відновлюється миттєво за рахунок коригування напруги керування U_k на вході ІП, тому відхилення швидкості внаслідок нестабільності мережевої напруги буде мінімальним

Приблизні рівності (3.1) і (3.4) можуть бути використані для визначення співвідношень між зовнішніми входними опорами РТ і РС, якщо відомі $I_{я.макс}$ і $\omega_{уст}$ і відповідні їм значення $U_{p.c\огр.}$ і U_y .

Під час опису налаштування системи автоматичного керування (САК) вважатимемо, що струм якоря є безперервним, а входні впливи є достатньо малими. Це дозволяє при розгляді структурної схеми системи скористатися лінеаризованим описом електродвигуна й припустити, що вихідна напруга регулятора швидкості (РШ) і, відповідно, струм якоря не обмежуються.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Завдання розділу

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» [10], виробниче середовище на робочому місці, безпечність технологічних процесів, експлуатація машин, механізмів та устаткування, а також стан засобів колективного та індивідуального захисту й санітарно-побутові умови мають повністю відповідати нормативно-правовим вимогам з охорони праці.

Під час підписання трудового договору роботодавець зобов'язаний під розписку ознайомити працівника з умовами праці на підприємстві. Зокрема, кандидат має бути чітко поінформований про наявні на робочому місці неусунені небезпечні та шкідливі виробничі фактори, потенційні наслідки їхнього впливу на організм, а також про законодавчо та колективним договором передбачені права на пільги й компенсації за роботу в таких умовах.

Відповідно до чинного законодавства [10], усі працівники підлягають обов'язковому соціальному страхуванню від нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань.

Якщо в нормативно-правових актах з охорони праці відсутні конкретні вимоги для забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці на певних ділянках, роботодавець зобов'язаний самостійно розробити та вжити відповідних заходів, узгодивши їх з органами державного нагляду.

Окрім цього, у колективному договорі сторони визначають порядок надання працівникам соціальних гарантій у сфері охорони праці, окреслюють їхні обов'язки, а також затверджують комплексні заходи, спрямовані на досягнення встановлених нормативів безпеки, гігієни праці й виробничого середовища, мінімізацію ризиків виробничого травматизму, профзахворювань та аварійних ситуацій.

Обов'язком роботодавця є організація розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві. Ця процедура здійснюється відповідно до порядку, затвердженого Кабінетом Міністрів України.

Окрім цього, законодавство гарантує працівникові право відмовитися від виконання дорученої роботи, якщо на виробництві виникла ситуація, що становить пряму загрозу його життю чи здоров'ю, безпеці оточуючих або навколишньому природному середовищу.

Під час виконання робіт зі шкідливими та небезпечними умовами праці, а також завдань, пов'язаних із забрудненням або несприятливим температурним режимом, персонал безкоштовно забезпечується спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), а також мийними та знешкоджувальними засобами відповідно до встановлених норм.

Крім того, на роботодавця покладається обов'язок у повному обсязі відшкодувати працівникові шкоду, заподіяну внаслідок каліцтва або іншого ушкодження здоров'я, що пов'язане з виконанням ним своїх трудових обов'язків.

4.2 Аналіз умов праці й виявлення небезпечних і шкідливих факторів

Аналіз умов праці для зазначеного технологічного процесу полягає в ідентифікації небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що чинять вплив на персонал під час виконання робіт, пов'язаних з електроприводом транспортних засобів.

На основі комплексного аналізу технологічного процесу модернізації електропривода транспортних засобів було виявлено такі шкідливі та небезпечні виробничі фактори:

1) Фізичні:

- відсутність чи недостача природного світла;

- недостатня освітленість робочої зони;
- знижена контрастність;
- гострі крайки, задирки і шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів, устаткування;
- підвищена напруга в електричному колі, замикання якого може відбутися крізь тіло людини.

Хімічні чинники (у разі використання лакофарбових матеріалів, розчинників або мастил під час монтажу):

- за характером впливу на організм людини – токсичні, подразнювальні;
- за шляхом проникнення в організм людини – через органи дихання (інгаляційний), шлунково-кишковий тракт (пероральний) та шкірні покриви.

Фізичні чинники (аерозолі переважно фіброгенної дії):

- пил абразивно-металевий, що утворюється під час зачищення та підготовки конструкцій до модернізації.

Біологічні небезпечні та шкідливі фактори:

- патогенні мікроорганізми та продукти їхньої життєдіяльності (актуально при роботі в закритих кузовах або боксах).

Психофізіологічні чинники:

- фізичні перевантаження – статичне напруження м'язів через тривале перебування у незручній робочій позі (зокрема, з нахилом тулуба до 30°);
- нервово-психічні перевантаження – тривале зосередження уваги, монотонність праці під час виконання однотипних операцій з електромонтажу, а також перенапруження зорового та слухового аналізаторів.

З метою запобігання травматизму та покращення умов праці необхідно розробити організаційні та технічні рішення.

4.3 Розрахунок штучного освітлення

Відсутність або дефіцит природного освітлення, а також недостатня освітленість робочої зони призводять до передчасної втоми зорових аналізаторів, викликають подразнення слизової оболонки ока та суттєво підвищують ризик виробничого травматизму.

Для штучного освітлення виробничих приміщень, зазвичай, застосовуються сучасні енергоефективні світлодіодні (LED) джерела світла або газорозрядні лампи низького й високого тиску: люмінесцентні (ЛЛМ), дугові ртутні (ДРЛ), металогалогенні (МГЛ), натрієві (ДНаТ) та ксенонові (ДКсТ). Традиційні лампи розжарювання допускається використовувати лише у виняткових випадках – за умови неможливості або обґрунтованої техніко-економічної недоцільності впровадження більш сучасних джерел світла.

У громадських та адміністративно-побутових будівлях тривалий час базовим стандартом штучного освітлення залишалися люмінесцентні джерела світла. Такі лампи застосовують за наявності підвищених вимог до якості відтворення кольорів, незалежно від розряду зорової роботи.

Вони мають суттєві переваги порівняно з лампами розжарювання, серед яких: висока світлова віддача, тривалий термін служби, можливість вибору джерел із різноманітним спектральним складом та вищим індексом передачі кольору. Крім того, вони характеризуються відносно низькою яскравістю світної поверхні, що знижує засліплювальний ефект.

З фізичного погляду, будь-яке джерело світла є пристроєм для перетворення певного виду енергії в оптичне випромінювання. У люмінесцентних лампах оптичне випромінювання генерується всередині газорозрядної колби внаслідок електричного розряду в газах, металевих парах

або їхніх сумішах із подальшим перетворенням ультрафіолету шаром люмінофору.

У вечірній час доби, а взимку й у денний для безпечної роботи в даному розділі дипломного проекту згідно [11] робимо розрахунок штучного освітлення в цеху середніх ремонтів площею 2067.6 м²

Завданням розрахунку є визначення необхідної потужності електричної освітлювальної установки для створення на ділянці заданої освітленості.

Необхідна кількість ламп визначається [11]:

$$n = E_{\text{нmin}} \cdot S \cdot k_z \cdot Z / \Phi \cdot \eta, \quad (4.1)$$

де $E_{\text{нmin}} = 300$ лк – нормована освітленість;

$S = 2067.6$ м² площа цеху;

$k_z = 1.5$ – коефіцієнт запасу;

$\Phi = 3050$ лм – світловий потік лампи ЛБ-36;

η – коефіцієнт використання світлового потоку;

Для визначення η знаходимо індекс приміщення:

$$i = A \cdot B / H \cdot (A + B), \quad (4.2)$$

де A й B – довжина й ширина ділянки, м;

H – повна висота приміщення, м;

$$i = 86.15 \cdot 24 / 6.5 \cdot (86.15 + 24) = 2.93$$

Тоді коефіцієнт використання $\eta = 1.3$.

$$n = 300 \cdot 86.15 \cdot 1.5 \cdot 1.3 / 3050 \cdot 0.62 = 51.03 \text{ ламп}$$

Приймаємо число ламп рівне 52.

Визначаємо число світильників у ряді:

$$N = n / 2 \quad (4.3)$$

де n – кількість ламп;

2 – число ламп у світильнику;

$$N=52/2=26 \text{ світильника.}$$

Розміщуємо світильники в два ряди по 13 в кожному.

4.4 Електробезпека

Досліджуване виробниче приміщення за ступенем небезпеки ураження електричним струмом належить до категорії особливо небезпечних. Виконаємо розрахунок захисного заземлення електрообладнання виробничої зони депо.

Для усунення ризику ураження персоналу електричним струмом, граничний опір заземлювального пристрою має становити R_z 4Ом. Як вертикальні заземлювачі (електроди) приймаємо кутову сталь із шириною полиці 40 мм і довжиною 2,5 м.

Для горизонтальних зв'язків (магістралі заземлення) використовуємо сталеву смугу (шину) перерізом 4-40 мм. Параметри заземлювального пристрою обираємо відповідно до вимог нормативно-технічної документації [11].

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{\text{расч}}=K_c \cdot P, \quad (4.4)$$

де $K_c=1.4$ – коефіцієнт сезонності

$P=100$ Омхм – питомий опір ґрунту для глини.

$$\rho_{\text{расч}}=1.4 \cdot 100=140 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Еквівалентний діаметр стрижнів для кутової сталі $d=0,038$.

Визначаємо опір одиночного вертикального заземлювача:

$$R_{\text{ст.од.}}=\rho_{\text{расч}} \cdot [\ln(4 \cdot l/d)+0.5 \cdot \ln((4 \cdot t+1)/(4 \cdot t-1))]/2 \cdot \pi \cdot l, \quad (4.5)$$

де $l=2.5$ м – довжина стрижнів;

$d=0.038$ м – еквівалентний діаметр стрижнів;

$$t=h_0+l/2, \quad (4.6)$$

$h_0=0.5$ м – глибина закладення вертикальних стрижнів;

$$t=0.5+2.5/2=1.75 \text{ м}$$

Тоді

$$R_{\text{ст.од.}}=140([\ln(4(2.5/0.038))+0.5(\ln(4(1.75+2.5)/(4(1.75-2.5)))]]=47.9 \text{ м}$$

Довжина сполучної смуги дорівнює периметру прямокутника 6×5 , тобто 22 м. Вертикальні стрижні розміщені через кожні 2 м - усього 11 стрижнів.

Опір сполучної смуги визначається в такий спосіб:

$$R_{\text{прасч}}=\rho_{\text{прасч}} \cdot \ln(l_{\text{п}}^2/d \cdot h)/k_{\text{гисп}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l_{\text{п}}, \quad (4.7)$$

де $l_{\text{п}}$ - довжина смуги;

$d=0.04$ м - ширина смуги;

$h=0.5$ м - глибина закладення смуги;

$k_{\text{гисп}}=0.27$ - коефіцієнт використання смуги.

$$R_{\text{прасч}}=140 \cdot \ln(22^2/0.04 \cdot 0.5)/0.27 \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 22=37.86 \text{ Ом}$$

Необхідний опір розтіканню вертикальних стрижнів:

$$R_{\text{св}}=R_{\text{прасч}} \cdot R_3/(R_{\text{прасч}}-R_3), \quad (4.8)$$

$$R_{\text{св}}=37.86 \cdot 4/(37.86-4)=4.47 \text{ Ом}$$

Остаточо визначаємо число вертикальних стрижнів:

$$N=R_{\text{прасч}}/k_{\text{испст}} \cdot R_{\text{св}}, \quad (4.9)$$

де $k_{\text{испст}}$ - відношення відстані між вертикальними електродами до їхньої довжини.

$$N=37.86/(2/2.5)(4.7)=10.59 \text{ (11 стрижнів).}$$

Усі з'єднання сталевих заземлювальних провідників або стрижнів мають бути виконані методом зварювання внапуск. Приєднання заземлювальних провідників до корпусів електроустаткування здійснюється за допомогою болтових з'єднань розміром не менше ніж М10.

ВИСНОВКИ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано підвищення експлуатаційної надійності електричного обладнання тролейбуса.

В першій частині виконано аналіз вимог до якості електричної енергії та електромагнітної сумісності встановленого на тролейбусі електрообладнання; аналіз електричних показників роботи тягового електродвигуна тролейбуса; аналіз діагностики роботи тягового електродвигуна тролейбуса.

В другій частині розглянуто побудову і роботу діагностичного стенду з дослідження двигунів постійного струму; функціональна схема дослідницького стенду електроприводу; діагностування електроприводу на холостому ходу; технічне обслуговування і ремонт електронних систем рухомого складу; контроль якості електричних контактів.

В третій частині виконано математичне обґрунтування вибору системи управління діагностикою електроприводу; контроль температури та тепловий захист інтелектуальних модулів електроприводу; структури з порівнянням сигналів задання і зворотних зв'язків; управління електроприводом в системі з підпорядкованим струмовим контуром.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі були розглянуті питання з охорони праці, де розроблені організаційні та технічні заходи зі створенням безпечних та нешкідливих умов праці на об'єкті.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Любивий В. С., Довгаль А. С. Удосконалення системи безперебійного електроживлення для комп'ютерного обладнання ХІХ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ «СТАЛИЙ РОЗВИТОК МІСТ: ПОСТВОЄННИЙ ПЕРІОД» 18 квітня 2026 р м. Харків.
2. European Commission. (2023). *Regulation (EU) 2023/... on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFIR). Text adopted*.
3. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. *навч. посібник* Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004. 404с.
4. Попович М. Г., Артименко Л. Ф., Бурмістенков О. П. та ін. Електричні машини та електропривод побутової техніки: *Підручник*. За ред. Д. Б. Головка, М. Г. Поповича. – 2-ге вид., стеретик. К.: Либідь, 2004. 352с.
5. Буртний В. В., Карплюк Л. Ф., Панченко Б. Я.. Тиристорний електропривід постійного струму: *Навч. посібник* Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007. 128с.
6. Барало О. В., Самойленко П. Г., Гранат С. Є., Ковальов В. О. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: *Навчальний посібник* К.: Аграрна освіта, 2010. 557с.
7. Колісник М. П., Шевченко Д. Ф., Мелашич В. В. Основні розробки, виробництва, монтажу, випробувань та обстежень підйомно-транспортних машин. *Навчальний посібник* Дніпропетровськ: *Пороги*, 2007. 193с.
8. A New Range Of Medium Voltage Multilevel Inverter Drives With Floating Capacitor Technology. Beinhold Georg // EPE 2001 – Graz. – P. 42–44.
9. Dynamic Average-Value Modeling of a Four-Level Drive System / Corzine Keith // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2003. – № 18. – P.
10. Закон України «Про охорону праці». – К., 2016.

11. Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності». – К., 2001.