ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ВПРОВАДЖЕННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:
Микола ГОРБАТОВ
гр. ЕТ 2022-1

Керівник:
Олександр ПЕТРЕНКО
проф., д.т.н.

Харків
2026

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
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Горбатов Микола Віталійович

1. **Тема роботи**: **Впровадження вентильно-індукторного електродвигуна на електричному транспорті**

керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи **…..Петренко Олександр Миколайович, д.т.н. проф**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від 22.05.2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 20.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи Матеріали переддипломної практики, статистичні дані по надійності та відмовам транспортних засобів, літературні джерела по експлуатації, обслуговуванню та ремонту електричного обладнання.

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

4.1. Аналіз міського електричного транспорту

4.2. Аналіз розробок вентильно-індукторних двигунів

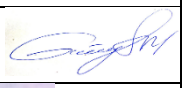
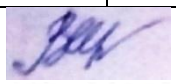
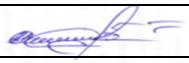
4.3. Розробка електричної принципової схеми керування вентильно-індукторним двигуном

4.4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу

Результати аналізу транспортних засобів, конструкція та результати дослідження Вентильно –індукторного двигуна.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	**Ім'я Прізвище та посада консультанта**	**Підпис, дата**	
		завдання видав	**завдання прийняв**
Основна частина	*Олександр ПЕТРЕНКО проф.*		
Антиплагіат	*Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.*		
Нормоконтроль	*В'ячеслав ШАВКУН, доц.*		

7. Дата видачі завдання 16.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

п/п	**Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи**	**Строк виконання етапів роботи**	**Примітка**
1	*Стан питання*	23.05 − 29.05.2026	
2	*Розробка технічного завдання*	30.05 − 05.06.2026	
3	*Розрахункова частина*	06.06 − 12.06.2026	
4	*Охорона праці*	06.06 − 12.06.2026	
5	*Оформлення паперового та електронного варіантів роботи*	06.06 − 12.06.2026	
6	*Підготовка доповіді та презентації*	12.06 − 20.06.2026	

Здобувач **Микола ГОРБАТОВ**

Керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи **Олександр ПЕТРЕНКО**

РЕФЕРАТ

В бакалаврській роботі на тему «Впровадження вентильно-індукторного електродвигуна на електричному транспорті» розлянуто можливість використання вентильно-індукторного двигуна для потреб міського електричного транспорту.

Проведено аналіз міського електричного транспорту.

Проведено аналіз існуючих конструкцій вентильно-індукторних машин;

Проведено аналіз рівнянь, що ілюструють основні залежності у вентильно-індукторній машині;

Проведено розрахунок основних розмірів магнітної системи та обмотувальних даних вентильно-індукторної машини;

Розроблено алгоритм роботи системи управління вентильно-індукторним електроприводом;

В роботі розглянуто питання Охорони праці при експлуатації енергоустановок тролейбусного депо.

Бакалаврська робота містить 56 сторінок, 12 рисунків, 4 таблиці.

ЗМІСТ

ВСТУП……6
1. Аналіз міського електричного транспорту……..8
1.1 Порівняльний аналіз характеристик тягових електроприводів……..8
1.2 Аналіз тягових електроприводів які використовуються на транспортних засобах міського електротранспорту……10
1.3 Особливості експлуатації різних типів електроприводів, які використовуються на міському електротранспорті……..14
2. Аналіз розробок вентильно-індукторних двигунів……16
2.1 Принцип роботи вентельно-індукторного двигуна …… 16
2.2 Основні залежності у вентельно-індукторному двигуні …… 18
2.3 Різновиди конструктивного виконання вентельно-індукторного двигуна ……19
3. Розробка електричної принципової схеми керування вентильно-індукторним двигуном……22
3.1 Основні математичні залежності, що характеризують процеси в ВІД ...22
3.2 Розробка алгоритму роботи системи управління вентельно-індукторного клкетродивгуна …….. 26
3.3 Вибір елементної бази……...34
3.4 Розробка функціональної схеми електроприводу……..40
4. Охорона праці……42
4.1 Аналіз нормативно-правової бази з охорони праці……42
4.2 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів……..44
4.3 Організаційні заходи безпеки при експлуатації енергоустановок тролейбусного депо……45
4.4 Технічні заходи з електробезпеки та захисту персоналу.....46
ВИСНОВКИ…… 52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……53

ВСТУП

Рухомий склад слід розглядати як комплексний технічний об'єкт, який поєднує численні механізми та системи, необхідні для його функціонування та управління. З часом конструкція транспортних засобів зазнає постійного ускладнення через інтеграцію новітніх агрегатів і функцій. Водночас сучасне суспільство встановлює високі вимоги до надійності як усього транспортного засобу, так і його окремих компонентів, не втрачаючи інтересу до зниження вартості виробництва. Ці суперечливі тенденції зумовлюють потребу у постійних наукових дослідженнях, що спрямовані на технологічне оптимізування існуючих вузлів та агрегатів, підвищення їх надійності та забезпечення функціональності, яка відповідала б сучасним вимогам.

На сьогодні більшість приводів на рухомому складі електричного транспорту базується на двигунах постійного струму, які демонструють такі важливі переваги: плавне та широке регулювання частоти обертання, високий коефіцієнт корисної дії (зумовлений можливістю досягати значних кількостей обертів), компактність конструкції, лінійність механічних характеристик, прийнятні регулювальні параметри, високий пусковий момент і відсутність самохідного режиму. Однак ці пристрої мають і слабкі сторони, серед яких слід виокремити наявність щіткового вузла, що негативно впливає на надійність двигуна та може спричиняти радіоперешкоди. Крім того, зазначені двигуни характеризуються складною й дорогою конструкцією, а також обмеженнями в експлуатації порівняно з перспективними електромеханічними перетворювачами. Використання альтернативних типів електричних машин, таких як асинхронні двигуни, часто стикається з труднощами через специфічні вимоги до габаритів і параметрів бортової мережі рухомого складу.

Завдяки стрімкому прогресу в галузі мікроелектроніки та обчислювальної техніки, а також розвитку теорії оптимального управління електроприводами, все більше уваги приділяється розробці нових типів

безконтактних моментних двигунів постійного струму (БДПС), які працюють за допомогою цифрових електронних пристроїв. Можливості конструктивної та технологічної реалізації таких двигунів продиктовані низкою важливих чинників. Серед них слід виділити потенціал упровадження різноманітних способів і алгоритмів управління, особливо за допомогою цифрових технологій, а також прагнення створити оптимальні електроприводи з високими технічними та економічними показниками для конкретних умов експлуатації.

У контексті досліджень безконтактних двигунів особливе значення має їх теоретичне обґрунтування та вдосконалення конструктивного виконання. Комплексність алгоритмів управління безконтактними двигунами ускладнює їх реалізацію на основі дискретних елементів. Проте сучасний рівень розвитку мікропроцесорної техніки дозволяє значно покращити технічні та економічні показники таких електроприводів через застосування оптимізованих алгоритмів управління. У довгостроковій перспективі можливе повне усунення датчиків положення ротора завдяки їх заміні на програмний імітатор, здатний визначати положення за непрямими даними. Особливо перспективним виглядає створення безконтактних двигунів із вбудованою однокристальною мікроаопроцесором, що інтегрує функції керування та аналізу.

1 АНАЛІЗ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Сучасний міський електротранспорт – це трамваї, тролейбуси та електробуси (а також потяги метрополітену) – неможливий без ефективного тягового електроприводу, який перетворює електричну енергію на механічну роботу обертання коліс. За останні півстоліття на транспорті змінилося кілька поколінь приводів: від класичних реостатно-контакторних (РК) до сучасних частотно-регульованих асинхронних та синхронних з постійними магнітами. Експлуатація кожного типу має свої особливості, переваги та недоліки, що впливають на надійність, енергоефективність, комфорт пасажирів та вартість обслуговування.

1.1 Порівняльний аналіз характеристик тягових електроприводів

Для міського електротранспорту застосовуються чотири основні типи тягового приводу: реостатно-контакторний (РК) з двигуном постійного струму послідовного збудження; тиристорно-імпульсна система керування (ТІСК) з двигуном постійного струму незалежного збудження; транзисторна система (IGBT) з двигуном постійного струму або асинхронним двигуном; частотний привод з асинхронним короткозамкненим двигуном та векторним керуванням. У таблиці 1 наведено основні технічні та експлуатаційні характеристики.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика тягових електроприводів міського електротранспорту

Параметр	РК (постійний струм)	ТІСК (постійний струм)	IGBT-транзистор (постійний струм)	Частотний асинхронний
Діапазон регулювання швидкості	1:2,5 (ступенево)	1:4 (плавно)	1:5 (плавно)	1:10 (плавно)
| ККД в тяговому режимі	70-78%	| 85-90%	88-93%	92-96%
Коефіцієнт рекуперації	0% (немає)	до 15%	до 25%	до 40%
Рівень шуму при розгоні	85-95 дБА (перемикання контакторів)	75-82 дБА	65-75 дБА	55-65 дБА (плавний свист)
Надійність (наробіток на відмову)	500-1000 год	3000-5000 год	8000-12000 год	15000-20000 год
Відносна вартість обладнання	1 (база)	1,2-1,4	1,5-1,8	2,0-2,5
Складність обслуговування	Висока (чищення контактів, дугогасіння)	Середня (тиристорні модулі)	Низька (безконтактний)	Низька (асинхронний двигун без щіток)
Електромагнітна сумісність	Погана (іскріння)	Задовільна	Добра	Дуже добра (синусоїдальний струм)

Як видно з таблиці, частотний асинхронний привод є найсучаснішим – він забезпечує найвищий ККД, глибоку рекуперацію, тиху роботу та мінімальні витрати на технічне обслуговування. Однак його вартість поки що значно вища. ТІСК та IGBT-приводи з двигунами постійного струму є проміжним етапом, але вони мають проблему з колекторно-щітковим вузлом (зношування щіток кожні 6-12 місяців, ризик кругового вогню). Реостатно-контакторний привод – безнадійно застарілий, але досі експлуатується на

старих трамвайних вагонах (КТМ-5, Татра Т3) та тролейбусах (ЗіУ-9) через дешевизну ремонту.

1.2 Аналіз тягових електроприводів які використовуються на транспортних засобах міського електротранспорту

Розподіл приводів за видами транспорту зумовлений технічними вимогами (потужність, маса, обмежений простір) та економікою.

Трамвай.

Трамвайні вагони мають жорсткі вимоги до пускового моменту (адже стартують часто і з місця) та енергозбереження через зупинки на кожній зупинці. На старих вагонах (Т3, Т6В5, КТМ-5) встановлено РК-привід (тяговий двигун ДК-210, ДК-259 потужністю 40-50 кВт). Його експлуатація вимагає щоденного огляду дугогасильних камер та регулювання контакторів. На вагонах серії Татра Т3, що пройшли модернізацію (Т3М, Т3Р), встановлюють ТІСК або IGBT-контролери (наприклад, «Progres» чеської фірми Cegelec). Сучасні низькопідлогові трамваї (Electron T5L64, КТМ-31, «Кастор») оснащуються виключно асинхронним частотним приводом з двигунами 70-120 кВт та IGBT-інверторами (виробники: Škoda, Vossloh, Alstom). Рисунок 1 (схематичне порівняння компонування РК-приводу та частотного приводу) показує, що асинхронний варіант займає на 40% менше простору в підвагонному просторі.

Рисунок 1.1 – трамвай Electron T5L64

Тролейбус.

Для тролейбуса важливі плавність пуску (щоб не смикати пасажирів) та можливість рекуперації при гальмуванні. Старі моделі (ЗіУ-9, Škoda 9Tr) мали РК з двигуном ДК-213 (110 кВт) та реостатно-контакторний контролер. На них постійно вигорали резистори, а рекуперація була відсутня. Модернізовані тролейбуси (ЗіУ-682Г-016, «Богдан Т701») отримали ТІСК або IGBT (наприклад, контролер «Азов» або «Чергос»). Це дозволило знизити витрати електроенергії на 15-20%. Найновіші тролейбуси з автономним ходом (тобто електробуси з можливістю роботи від акумуляторів) використовують асинхронний частотний привод (як на електробусах), що дає змогу рекуперувати енергію в акумулятори під час гальмування. Приклад – тролейбус «Богдан Т901» з системою DrivePro компанії Siemens.

Рисунок 1.2 – Тролейбуси Богдан Т901

Метрополітен.

Тут переважають асинхронні пристрої через великі потужності (двигуни 150-300 кВт) та високі швидкості (до 80 км/год). Вітчизняні вагони Е, Ем, Еж3 мали РК, але нові серії (81-717/714 – модернізація, 81-540/541) переходять на IGBT та асинхронні двигуни. Наприклад, вагони метро серії 81-765/766 повністю оснащені асинхронним приводом з рекуперацією до 38%.

Рисунок 1.3 – Вагони метрополітену ЕЖ3 з асинхронним приводом

Електробус.

Цей вид транспорту використовує виключно асинхронний або синхронний з постійними магнітами (PMSM) привод через необхідність

максимального ККД для економії акумуляторів. Електробус «Богдан Е701» має асинхронний двигун (140 кВт), а «Solaris Urbino 12 electric» – синхронний із постійними магнітами (160 кВт), який забезпечує ККД 96% проти 92% у асинхронного.

Рисунок 1.4 - Електробус «Богдан Е701»

Таблиця 1.2 – Застосування типів тягового приводу на міському електротранспорті

Тип транспорту	Моделі з РК	Моделі з ТІСК/IGBT	Моделі з асинхронним приводом
Трамвай	Татра Т3, КТМ-5, Т6В5	Татра Т3М, Electron Т3L44	| Electron Т5L64, КТМ-31, Urbos 3
Тролейбус	ЗіУ-9, Škoda 9Tr, ЮМЗ Т1	ЗіУ-682Г-016, Богдан Т701	Богдан Т901, Solaris Trollino, МАЗ 303
Метровагон	Еж3, 81-717 (частина)	81-540, 81-541 (модерн.)	81-765/766, Русич, Metropolis
Електробус	–	рідко (експериментальні)	Богдан Е701, Solaris Urbino, Ebusco

1.3 Особливості експлуатації різних типів електроприводів, які використовуються на міському електротранспорті

Експлуатація реостатно-контакторних приводів вимагає значних трудовитрат: через кожні 2-3 доби необхідно чистити контакти від нагару, регулювати розчини контактів, замінювати підгорілі резистори пускових реостатів. Характерна несправність – заклинювання кулачкового вала контролера при попаданні мастила. Надійність таких систем низька, тому їх залишають тільки на допоміжних лініях.

Тиристорно-імпульсні системи (ТІСК) мають проблеми з охолодженням тиристорів – при тривалій роботі в горбистій місцевості вони перегріваються, тому в депо встановлюють додаткові вентилятори. Важливо контролювати ізоляцію силових кіл, оскільки комутація створює високовольтні викиди (до 2000 В замість 550-750 В). Транзисторні IGBT-системи більш стійкі, але вони чутливі до коротких замикань у ланцюзі двигуна – вихідний модуль виходить з ладу миттєво, і вартість заміни складає 1000-2000 євро.

Асинхронний частотний привод, попри високу надійність, потребує кваліфікованого обслуговування: перевірки системи керування (процесора), оновлення прошивки (програмного забезпечення), контролю стану підшипників двигуна (вібродіагностика), а також захисту від перенапруг (через рекуперацію). Якщо в напівпровідниковому модулі виходить з ладу IGBT-транзистор, його заміна можлива лише в спеціалізованому сервісі.

Енергетична та економічна ефективність

В роботі проведено дослідження по енергоспоживанню різних типів приводів.

РК-привід споживає 2,3 кВт·год/вагон·км, ТІСК – 1,9 кВт·год, IGBT з постійним струмом – 1,7 кВт·год, асинхронний частотний – 1,4 кВт·год (з урахуванням рекуперації 30%). Річні витрати на електроенергію для парку з 50 одиниць (пробіг 50 000 км на рік) складуть: для РК – 5,75 млн грн, для асинхронного – 3,5 млн грн (при тарифі 2,0 грн/кВт·год). Економія – понад 2 млн грн на рік, що окуповує вартість заміни приводу за 2-3 роки.

Таким чином, при модернізації міського електротранспорту найдоцільніше впроваджувати асинхронні частотні приводи, а за браком коштів – IGBT-системи з двигунами постійного струму, які дозволяють використати старі тягові двигуни після капремонту. Експлуатація застарілих РК-приводів має бути припинена в найближчі 5-7 років через низьку енергоефективність та високі витрати на обслуговування.

В бакалаврській роботі запропоновано використовувати в якості приводного вентильно-індукторний двигун, який має енергетичні характеристики більш високі ніж в тяговом асинхронном частотном приводі.

2. АНАЛІЗ РОЗРОБОК ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ

2.1 Принцип роботи вентельно-індукторного двигуна

Вентильно-індукторний двигун (ВІД) слугує комплексом, що включає електромеханічний перетворювач та блок управління (БУ). Електромеханічний перетворювач, представлений на рис. 2.1, є синхронною реактивною машиною, яка характеризується різною кількістю зубців на статорі та роторі. Особливість конструкції ВІД полягає у використанні дробового співвідношення між числом зубців статора Z_1 та числом зубців ротора Z_2. Вказані параметри, тобто кількість зубців статора і ротора, визначаються відповідно до наступної формули.

$$Z_1 = Z_2 \pm 2k \tag{2.1}$$

де k = 1, 2, 3 – натуральний ряд чисел.

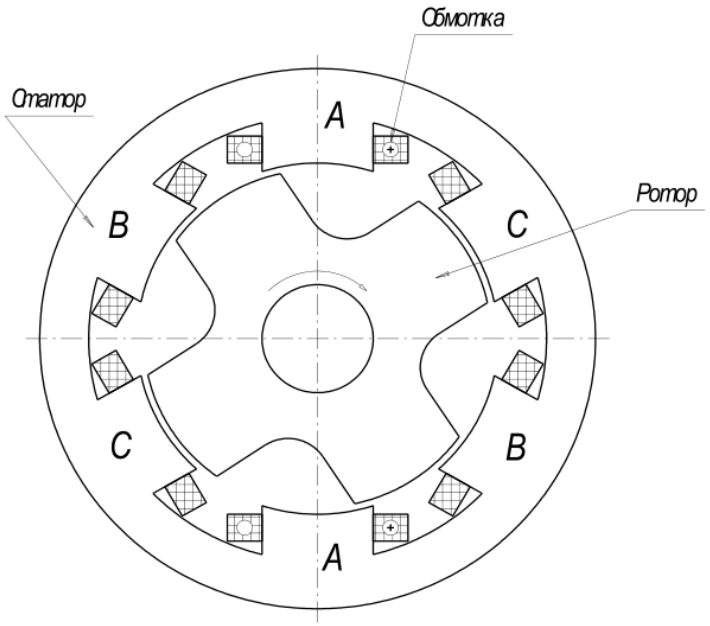


Рисунок 2.1 - Індукторна машина конфігурації 6/4

Поширені зміни: 6/4, 8/6, 10/8, 12/10.

Статор і ротор виготовляються із застосуванням шихтованих магнітопровідних матеріалів. Обмотки статора мають зосереджену

конструкцію, причому кожна фаза розташовується на двох зубцях, які знаходяться діаметрально протилежно. Кількість фаз (m) визначається відповідно до встановленого математичного співвідношення.

$$m = Z_1/2 \tag{2.2}$$

Ротор цього електродвигуна не містить обмоток, що свідчить про його пасивний характер. Електронний блок керування складається із наступних компонентів:

- модуля управління комутацією, який реалізує алгоритм перемикання фаз електродвигуна відповідно до заданих параметрів;

- датчика положення ротора, що забезпечує можливість визначення оптимальних моментів для активації або деактивації фаз;

- електронного комутатора, який вбудовується в модуль управління комутацією і виконує функцію підключення фаз до джерела електроживлення;

- за необхідності може додатково містити датчик струму для контролю електричних параметрів системи.

Функціонування вентильного індукторного двигуна (ВІД) базується на принципі взаємодії зубців статора і ротора, де статорні зубці створюють магнітне поле, а ротора намагаються зайняти найбільш енергетично сприятливе положення. Зубці ротора прагнуть розташуватися відносно збуджених зубців статора в положенні, яке забезпечує максимальну енергію магнітного поля. У цьому контексті розглядаються два основні положення зубців статора і ротора:

1. Неузгоджене положення: Зубці ротора знаходяться навпроти пазів статора, що призводить до мінімального значення енергії магнітного поля і фазної індуктивності (позначається як Lmin). Це пояснюється підвищеним магнітним опором у міжзубцевому зазорі.

2. Узгоджене положення: У цьому випадку зубці ротора розташовані строго навпроти зубців статора. Енергія магнітного поля та фазна індуктивність досягають свого максимального значення (Lmax) завдяки найнижчому магнітному опору в зазорі.

Згенерований момент ВІД залежить, за інших рівних умов, від співвідношення максимальної та мінімальної фазної індуктивності (Lmax/Lmin), яке зазвичай знаходиться в діапазоні 7–10. Збільшення цієї різниці сприяє росту моменту.

2.2 Основні залежності у вентельно-індукторному двигуні

У процесі переміщення зубців ротора вздовж активних зубців статора виникають основні закономірності, які демонструють принципи функціонування ВІД .

Крім наведених залежностей, на практиці та при розрахунках ВІД використовують так само сімейство кривих $\psi = f(I,\theta)$, - потокозчеплення у функції кута повороту ротора та струму у фазі (рис. 2.2). Ця залежність відбиває зміна показників магнітної системи до узгодженого положення $\theta_{\text{узгод}}$.

Робота фази починається при включенні її в положенні ротора близькому до неузгодженомувстановленого значеннядо значення $\theta_{\text{вкл}}$.

Після досягненням струмом деякого значення Іст відбувається зростання потокозчеплення від $\psi_{\text{в}}$ до $\psi_{\text{с}}$.

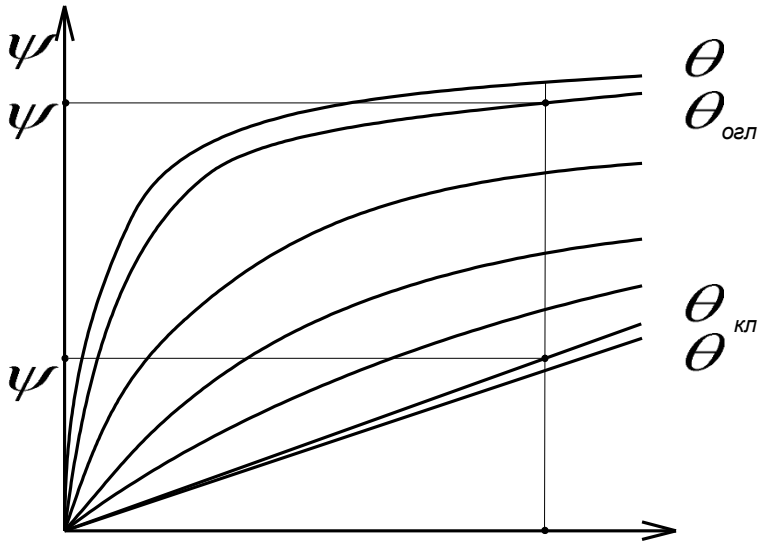


Рисунок 2.2 - Криві намагнічування при різних положеннях ротора

2.3 Різновиди конструктивного виконання вентельно-індукторного двигуна

Розробкою вибухозахищеного електрообладнання (ВІД) займаються численні міжнародні компанії, такі як Emerson (США) та Nec/Densai (Японія), а також низка вітчизняних виробників. Залежно від сфери використання конструкції ВІД можуть змінюватися й адаптуватися до різних умов. Розглянемо найпоширеніші типи:

а) класична індукторна машина (ІМ);

б) двофазний нереверсивний ВІД, принцип дії якого аналогічний до попереднього. Його конструкція представлена на 0 2.3;

в) електромагнітний вентильно-індукторний двигун (ЕВІД). Його конструкція зображена на рис.2.4. Основними особливостями ЕВІД є наявність m пакетів статора, де m відповідає числу фаз, рівність кількості зубців пакета статора і ротора, розташування фазних котушок на спинках статора, а також одночасне збудження всіх зубців одного пакета статора.

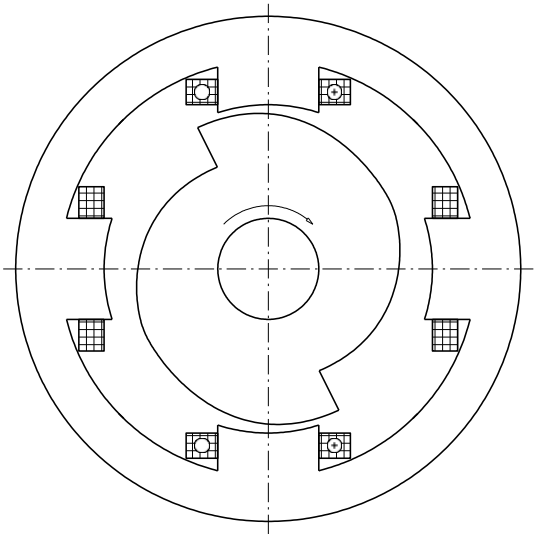


Рисунок 2.3 - Двофазний вигляд вентельно-індукторного двигуна

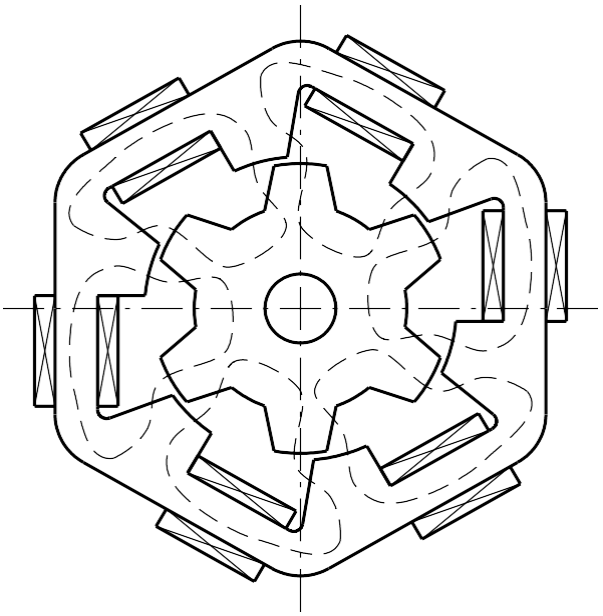


Рисунок 2.4 - Електромагнітний вигляд вентельно-індукторного двигуна

г) індукторні двигуни з підмагнічуванням постійними магнітами (ІДСП) характеризуються особливою конструкцією, яка має кілька варіантів побудови. Основні залежності роботи таких двигунів докладно описані у джерелі. На рис. 2.5 представлено схему конструкції ІДСП.

Кількість зубів ротора Z2 визначається кількістю статорних груп полюсів $2k_1$ згідно з формулою (2.3).

$$Z_2 = k_1(6Z_1 + n_1 \pm 2), \quad (2.3)$$

де Z_1 - число зубців на статорних полюсах, n_1- ціле число.

На рис.2.5 зображено машину з $Z_1 = 1$, $n_1 = 1, 2$ $k_1 = 1, 4$.

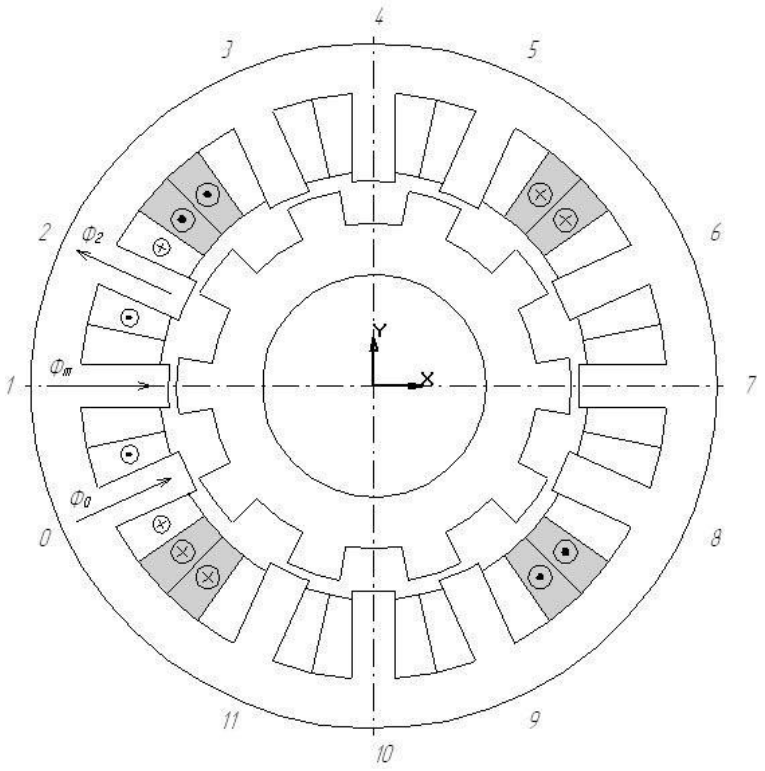


Рисунок 2.5 - Трифазний безконтактний моментний індукторний двигун із підмагнічуванням постійними магнітами

На полюсах, розташованих діаметрально протилежно, встановлені обмотки управління (ОУ). Живлення цих обмоток забезпечується від трифазних уніфікованих інверторів із применшеною напругою синусоїдальної форми. Хоча конструкція двигуна є складнішою, він характеризується зниженими пульсаціями моменту та спрощеним методом керування.

3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИМ ДВИГУНОМ

3.1 Основні математичні залежності, що характеризують процеси в ВІД

Основні математичні залежності, що характеризують процеси

Миттєва напруга однієї фази ВІД пов'язана з магнітним потоком згідно із законом Фарадея:

$$U = i \cdot R_m + \frac{d\varphi}{dt},$$

(3. де U – напруга фази; i - струм фази; R_m- опір обмотки; φ - магнітний потік, зчеплений з обмоткою.

Через подвійну зубчастість ВІД , рівняння (3.1) може бути розширено:

$$U = i \cdot R_m + \frac{\partial\varphi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial\varphi}{\partial\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (3.1)$$

де $\frac{\partial\phi}{\partial i}$ - є функцією миттєвої індуктивності $L(\theta,i)$; $\frac{\partial\phi}{\partial\theta}$ - є функцією миттєвої проти ЕРС $K_b(\theta,i)$.

Загальне рівняння крутного моменту

Рівняння (3.2) описує процес передачі електричної енергії в магнітне поле. Тепер зосередимося на рівняннях, що характеризують перетворення енергії поля в механічну енергію. Якщо помножити ліву і праву частини рівняння (3.1) на величину електричного струму, можна отримати формулу для обчислення миттєвої потужності.

$$Ui = i^2 R_m + i \cdot \frac{d\varphi}{dt}. \quad (3.2)$$

Ліва частина рівняння (3.3) описує миттєву електричну потужність, що подається на вхід об'єкта дослідження (ВІД). Перший доданок у правій частині

цього рівняння відображає омічні втрати в обмотці. Відповідно до закону збереження енергії, другий доданок у правій частині рівняння (3.3) має відповідати сумі механічної потужності, що передається від системи, та енергії, накопиченої в магнітному полі. У зв'язку з цим можна записати наступне:

$$i \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt}, \tag{3.3}$$

де $\frac{dW_m}{dt}$ - миттєва механічна потужність; $\frac{dW_f}{dt}$ - Миттєва потужність, запасена в магнітному полі.

Потужність, за своїм визначенням, є швидкістю зміни енергії. У цьому випадку W_m позначає механічну енергію, а W_f — магнітну енергію. Механічна енергія може бути виражена як функція крутного моменту та кутової швидкості:

$$\frac{dW_m}{dt} = M\omega = M\frac{d\theta}{dt}, \tag{3.4}$$

де M - крутний момент; $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ - кутова швидкість обертання валу.

Підстановка рівняння (3.5) до рівняння (3.4) дає:

$$i\frac{d\varphi}{dt} = M\frac{d\theta}{dt} + \frac{dW_f}{dt}. \tag{3.5}$$

Рішення рівняння (3.6) для крутного моменту виглядає наступним чином:

$$M(\theta,\varphi) = i(\theta,\varphi)\frac{d\varphi}{dt} - \frac{dW_f(\theta,\varphi)}{d\theta}. \tag{3.6}$$

Для постійного магнітного потоку рівняння (3.7) можна спростити:

$$M = -\frac{dW_f}{d\theta}. \tag{3.7}$$

Краще виражати крутний момент через електричний струм, а не через магнітний потік. Тому для його визначення використовують коенергію (Wc)

замість енергії магнітного поля (Wf). Щоб зрозуміти суть коенергії, спочатку аналізують енергію магнітного поля (рисунок 3.1).

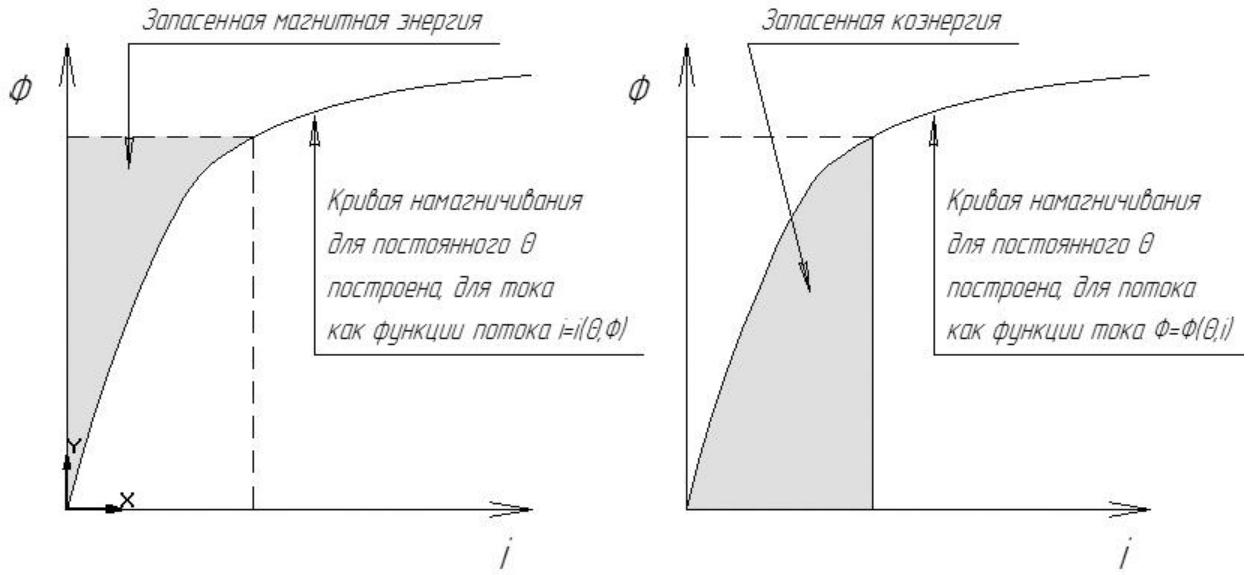


Рисунок 3.1 - Енергія магнітного поля та коенергія

Для постійного кута повороту ротора інтегрування $\left(\frac{d\theta}{dt}=0\right)$ рівняння (3.6) дає рівняння для магнітної енергії:

$$W_f = \int_0^{\varphi} i(\theta,\varphi)d\varphi. \tag{3.8}$$

Для заданого кута, якщо перейти до кривої намагнічування, яка описує залежність потоку від струму, замість зображення струму як функції потоку, заштрихована площа під цією кривою відповідає магнітній коенергії.

$$W_c = \int_0^{i} \varphi(\theta,i)di. \tag{3.9}$$

З рис. 3.1 видно, що площі, що визначають польову енергію та коенергію, можуть бути описані наступною залежністю:

$$W_c + W_f = i\varphi. \tag{3.10}$$

Продиференціювавши обидві частини рівняння (3.11) отримаємо:

$$dW_c + dW_f = \varphi di + id\varphi. \tag{3.11}$$

Виразивши диференціал польової енергії з рівняння (3.12) та підставивши його на рівняння (3.7), отримаємо:

$$M = \frac{id\varphi - (\varphi di + id\varphi - dW_c(\theta,i))}{d\theta}. \tag{3.12}$$

Для спрощення загальної форми рівняння крутного моменту, поданого у вигляді співвідношення (3.13), його зазвичай зводять до рівняння, справедливого для постійного значення струму. Диференціальна коенергія, у цьому контексті, може бути представлена через часткові похідні наступним чином:

$$dW_c(\theta,i) = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial W_c}{\partial i} di. \tag{3.13}$$

З рівнянь (3.13) і (3.14) досить легко показати, що з постійному струмі момент дорівнює:

$$M = \frac{\partial W_c}{\partial \theta}. \tag{3.14}$$

Спрощене рівняння крутного моменту

У процесі аналізу ефективності систем регулювання часто спрощують розгляд, і насичення магнітної системи не береться до уваги. За такого спрощення залежність магнітного потоку від струму набуває вигляду:

$$\varphi = L(\theta) \cdot i. \tag{3.15}$$

Індуктивність змінюється лише як функція кута ротора. Підстановка рівняння (3.16) до рівняння (3.10) та обчислення інтеграла дають:

$$W_c = \frac{i^2}{2} L(\theta). \tag{3.16}$$

І, потім, підстановка рівняння (3.17) рівняння (3.15) дає залежність для моменту ВІД

$$W_c = \frac{i^2}{2} L(\theta). \quad (3.18)$$

3.2 Розробка алгоритму роботи системи управління вентельно-індукторного електродивгуна

Керування процесом ВІД реалізується за допомогою програмних засобів, що гарантують точність і ефективність. Основними вхідними параметрами, які враховуються для формування сигналів управління, виступають часова тривалість подачі напруги живлення. Уся необхідна інформація про ці параметри може бути представлена в деталізованому вигляді на рисунку 3.2.

$$T_n = T_\phi + \tau, \quad (3.19)$$

де T_ϕ - тривалість подачі напруги живлення на фазу; T_ϕ - згасання.

У запропонованому алгоритмі згасання введено, як час, за який струм в активній фазі при відключеному напрузі живлення (або інвертованій напрузі) спадає до значення близького до нуля.

Від величини T_n залежить кутова швидкість ротора. Для аналізованої машини конфігурації 6/4 частота обертання ротора ω пов'язана з T_n наступним співвідношенням:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi/12}{T_n}. \quad (3.20)$$

Щоб змінити положення ротора на деякий кут θ, необхідно витратити енергію рівну:

$$W_\theta = M_c \cdot \theta + \left(\frac{I\omega_2^2}{2} - \frac{I\omega_1^2}{2} \right), \quad (3.21)$$

де M_c - момент опору обертання;

I - момент інерції ротора;

ω_2 - кутова швидкість ротора на початку та в кінці повороту ротора на кут відповідно.

Під час встановленого обертання, зміна кінетичної енергії ротора, що обертається (вираз у дужках), зводиться до нуля. Це означає, що для підтримання безперервного обертання ротора необхідно постійно підводити енергію, яка компенсує витрати на подолання існуючого моменту опору. У випадках, коли підводиться більше енергії, ніж це потрібно для підтримання сталого обертання, ротор здатний зробити швидший поворот на величину одного кроку та увійти у фазу коливань із поступовим затуханням. Ці коливання відбуваються навколо сталого (або узгодженого) положення, очікуючи наступного етапу.

Якщо ж швидкість обертання ротора перевищує певну межу, то надлишок енергії починає витрачатися на зменшення його кінетичної енергії. У ситуації, коли кутова швидкість ротора зменшується нижче деякого критичного значення, можливе повне зупинення обертання. Це відбувається через втрату відповідності між моментом включення фаз та фактичним положенням ротора, що порушує узгодженість системи управління.

Алгоритм, щоб забезпечувати стабільну роботу системи, функціонує в пошуковому режимі. Він орієнтується на середню величину напруги (Ucp) за часовий інтервал (Тп), при цьому стежить, щоб напруга не перевищувала рівня, за якого корисна частина підведеної енергії прагнула до W. Для визначення цих параметрів фіксується час, необхідний ротору для повороту від одного узгодженого положення до іншого. Якщо ж цей час відрізняється від заданого Тп, алгоритм вносить необхідні корективи у підведення енергії.

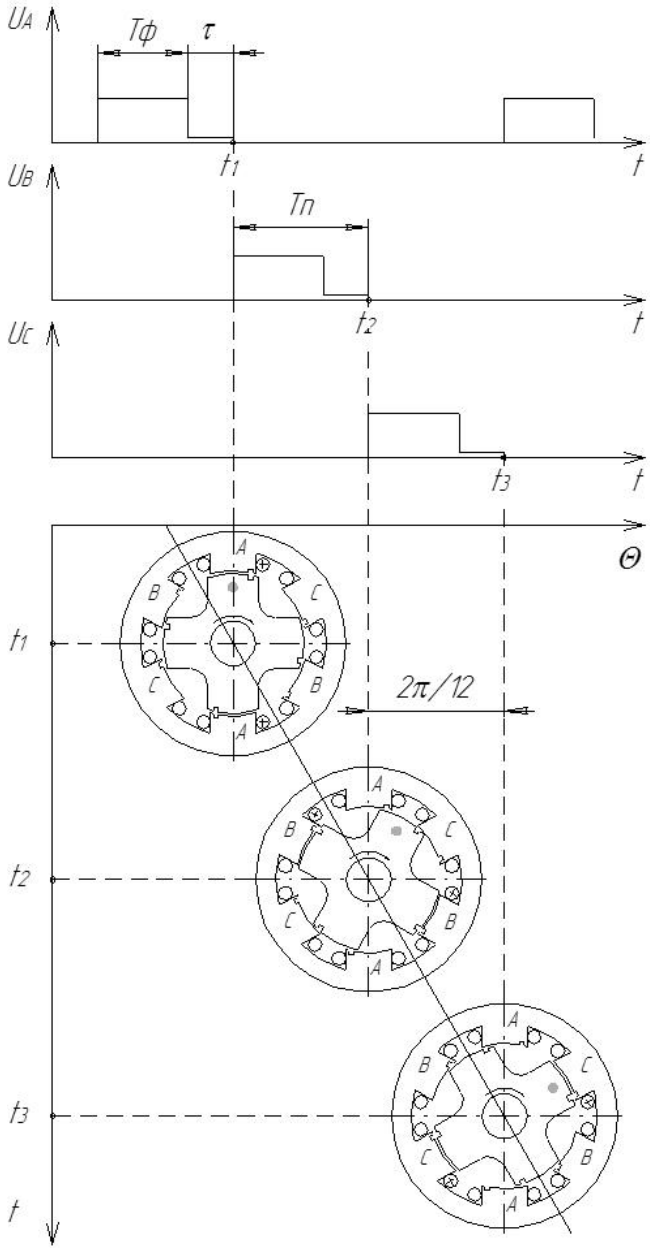


Рисунок 3.2 - Діаграма роботи

Неодмінною умовою роботи алгоритму є конструкція ВІД, у якої на статорі і роторі є проточки. Проточки виконані таким чином, що збігаються на фазі A_{i-1} у момент коли фаза A_i знаходиться в повністю неузгоджений стан.

Фазні обмотки повністю знеструмлюються лише після отримання "мітки". Після часу $T_п$ на щойно працюючу фазу подається тестовий сигнал. Середня напруга тестового сигналу мала, тому вплив його на обертання ротора незначний. Завдяки ньому детектуються

Він слугує для вимірювання часу, протягом якого реальний струм поступово спадає від моменту відключення напруги живлення до певного максимально допустимого значення, яке не перевищує Iн. Значення параметра згасання систематично коригується лише за умов змінення параметра Tп, пов’язаного зі специфікою роботи механізму.

Алгоритм, наведений у розглянутій конфігурації, передбачає три варіанти сценаріїв роботи, позначених як $i = 1, 2, 3$. Такий підхід є доцільним для систем із використанням ВІД (вигоряння імпульсу дисперсії) в рамках конфігурації 6/4, що забезпечує її оптимальну ефективність у заданих умовах.

Для наочності взаємодії елементів системи на рис 3.2 представлено детальну діаграму роботи, яка демонструє основні фази взаємодії та ключові показники параметрів. Діаграма дозволяє проводити аналіз і контроль за розвитком динамічних процесів у межах визначених сценаріїв.

Різниця між точками t_1 і t_2 на поданому графіку відображає значення таймера T_1 після проходження точки t_2. На діаграмі чітко показано відносне розташування проточок, що знаходяться на зубцях статора і ротора, відповідно, що забезпечує наочність розуміння процесу. У момент часу T_1 проточки фази А повністю збігаються, а наступною фазою, у якій відбувається збіг проточок, буде інша з фаз.

Описаний алгоритм роботи передбачає, що двигун вже перебуває в обертанні, тобто запуск уже виконаний, і в пам'яті системи містяться записи попередніх значень параметрів, таких як $T_я$, τ і $U_{ср}$. Таймер T_1 (основний) функціонує у синхронізації з сигналами від датчиків струму. Сигнали цих датчиків обробляються виключно у разі отримання переривання, яке сигналізує про зміну стану датчика. Для зручності опису алгоритм можна умовно поділити на кілька логічних частин, хоча всі вони працюють паралельно в реальному часі.

Перша частина алгоритму включає збір необхідної інформації й генерацію керуючих сигналів (її логіка зображена трьома гілками зліва). При

початковому увімкненні електропривода прапор старту автоматично встановлюється у значення "0". Під час першого кроку входить запис одиниці, і після цього система вже містить усі необхідні дані для проведення корекції процесу. Завдання першої частини полягає у визначенні точних часових інтервалів для вмикання й вимикання фаз.

Друга частина алгоритму обробляє дані, отримані з таймерів, і використовує їх для корекції параметрів у наступному кроці (відповідає правій гілці логіки на схемі). Кожен новий крок запускається на основі результатів обчислень, виконаних під час попереднього циклу обробки даних.

Слід зауважити важливу модельну умову для розуміння даного алгоритму: зміна кроку повинна бути достатньо малою, щоб інформація про згасання зі значеннями попереднього кроку залишалася релевантною й застосовною для нинішнього циклу. Похибку визначення в цьому випадку можна не брати до уваги, адже вона незначна й не впливає критично на роботу системи. Додатково припускається, що значення таймерів Тп і Т1 вважаються рівними навіть при незначній різниці в їх величинах, що забезпечує необхідну стійкість роботи алгоритму в реальних умовах.

Перед безпосереднім переходом до основного етапу роботи алгоритму проводиться запуск двигуна за допомогою окремого підхідного алгоритму. Головна особливість запуску електродвигуна без використання датчика положення ротора полягає у тому, що початкове положення зубців ротора відносно зубців статора залишається невідомим. Для ініціалізації процесу пуску подається напруга на дві сусідні фази статора, наприклад на фази А і В. Це призводить до того, що ротор займає одне із двох можливих початкових положень.

Перше можливе місце розташування ротора полягає у тому, що його зубець опиняється між двома сусідніми зубцями фаз статора (відображається на рис. 3.3б). Друге положення передбачає, що два зубці ротора розташовуються так, що частково перекривають зубці активних фаз статора (згідно з рис. 3.3а). Після цього одна із фаз поступово вимикається, змушуючи

ротор змінити своє розташування таким чином, щоб його зубці узгоджувалися із працюючою фазою (наприклад, залишеною включеною фазою А). Це узгоджене положення чітко продемонстровано.

Потім фази починають комутуватися з початковою швидкістю $T_{\text{п}}$.поч і з величиною середнього напруги $U_{\text{ср.поч}}$, випередження в кроковому режимі приймається рівним нулю. Частота комутації по деякому закону згідно із законом $U_{cp.\text{start}} = f(t, T_n)$. Після цього розпочинає роботу основний алгоритм.

Описаний алгоритм представлений рис.3.4.

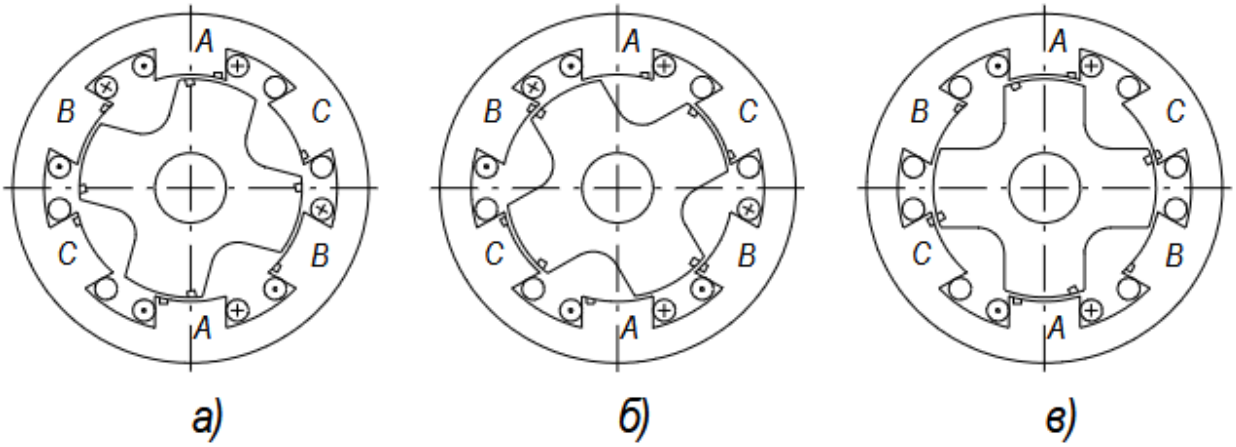


Рисунок 3.3 - Положення ротора ВІД під час запуску

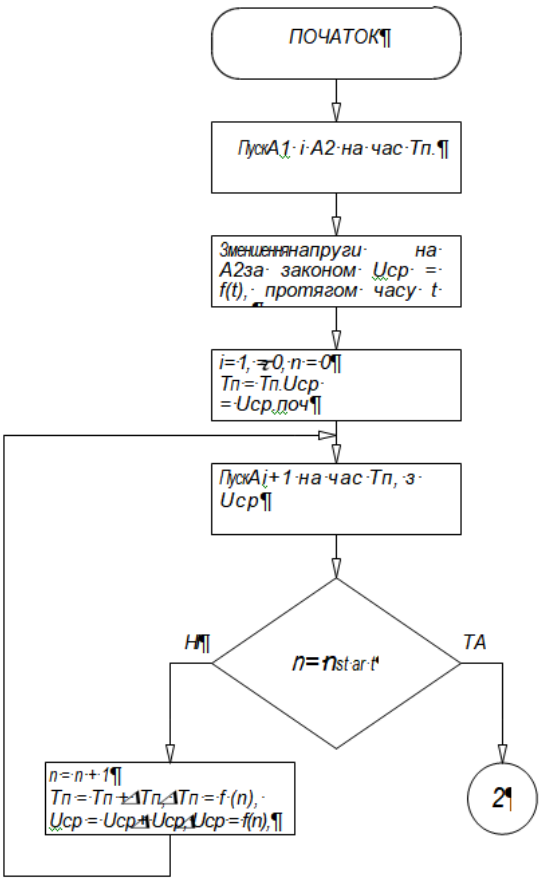


Рисунок 3.4 - Алгоритм запуску

Для досягнення високої ефективності роботи на швидкостях, наближених до максимальних, необхідно застосовувати випереджальне включення фаз. Воно забезпечує зростання струму у фазі до моменту невеликого перекриття зубців, у якому досягається максимальний обертальний момент двигуна. Визначення параметрів випередження здійснюється за допомогою додаткового алгоритму. Цей алгоритм враховує залежність кутової швидкості обертання ротора та поданої напруги, яка визначається через функцію *f(ω, Un)*.

Для цього використовується спеціальний таймер Т, який запускається в момент збігу сигналів і відлічує заздалегідь обчислений інтервал часу. Після закінчення цього інтервалу активується наступна фаза. Передбачається, що випереджальне вмикання фази відповідає величині напруги, рівній напрузі живлення.

Вплив даного підходу на створення обертального моменту двигуном проілюстровано на рис. 3.5. Представлений графік демонструє залежність для ділянки, де подача напруги відбувається рівномірно протягом одного сектора кута.

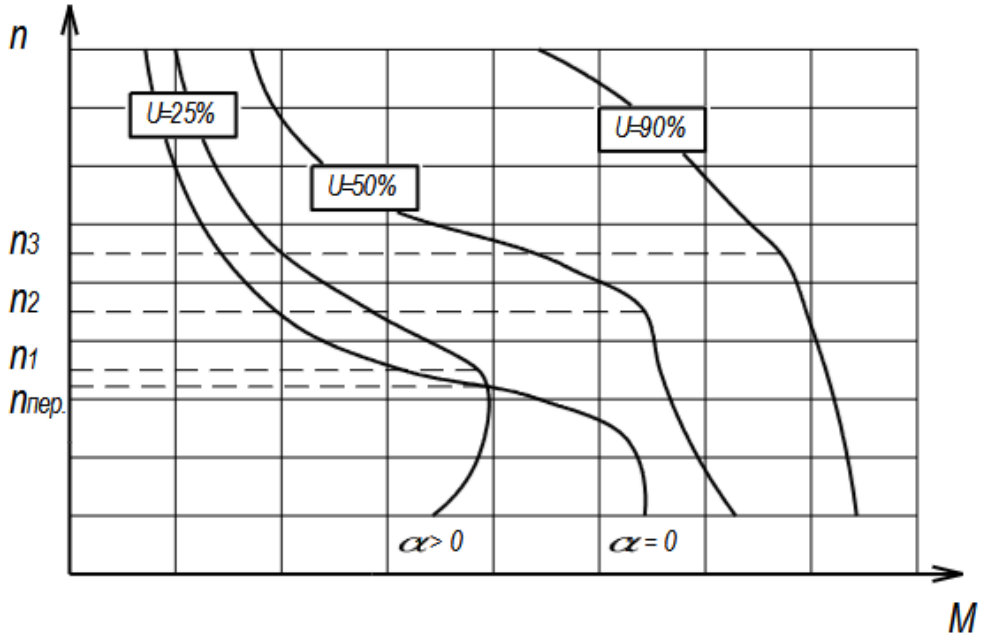


Рисунок 3.5 - Механічні характеристики

Видно, що при частотах вище nпер вигідно випереджає включення фаз. Частот $n_{пер} = n_1$, де n_1 частота, при якої починає діяти струмообмеження. Згідно з результатами, дуже важливою обставиною роботи ВІД є точка переходу (рисунок 3.5, точки n_1 n_2 n_3) приводу від режиму, в якому діє обмеження струму, тобто. середня напруга за крок нижче максимального - двигун є Джерелом моменту на ділянках нижче точок n1, n2, n3 слугує перехід пристрою до режиму максимальної потужності. У цьому режимі відсутні обмеження для струму, а фази під'єднуються на рівень максимальної середньої напруги, що дає змогу досягти оптимальних енергетичних показників. Особливістю такого режиму є те, що він виникає на частотах, вищих за певне граничне значення (за фіксованого моменту опору). При цьому подальше

нарощування частоти супроводжується незначною зміною споживаної потужності, оскільки збільшення частоти забезпечується зниженням моменту.

Загалом алгоритм вибору випередження має бути спрямований на те, щоб характерні точки сукупного моменту опору збігалися з аналогічними точками механічної характеристики системи у тих діапазонах, де енерговитрати є найменшими. Це означає, що досягнення оптимального режиму роботи залежить від коректного визначення і підтримання випередження напруги для забезпечення середнього оптимального рівня енерговитрат.

Для спрощення алгоритму управління доцільно приймати випередження фіксованим у межах малого заданого діапазону частот. Це дозволяє суттєво спростити функцію керування системою при збереженні її ефективності. Розрахунок величини випередження може бути виконаний за допомогою наступного виразу:

$$\alpha = \frac{i_{\max} \cdot L_{\min}}{U_n} \cdot \omega, \tag{3.22}$$

Де $i_{\max}$ - максимальний струм, який потрібно досягти в такті комутації; U_n- уапруга живлення фази; ω - гутова швидкість ротора.

Таке спрощення не лише полегшує впровадження алгоритму в системи різної складності, а й забезпечує стабільність роботи в заданих умовах.

3.3 Вибір елементної бази

Роль електроніки в автомобілях стрімко зростає, і щорічне збільшення функціональних можливостей досягає 7–10%, здебільшого завдяки впровадженню новітніх електронних технологій. Сучасний етап розвитку автомобільної електроніки характеризується такими ключовими тенденціями:

- заміна електричних вузлів на базі дискретних елементів новими електронними рішеннями;

- активне використання електронних пристроїв для діагностики та збору даних;

- постійне удосконалення всіх автомобільних систем.

Завдяки можливості реалізації практично будь-якого алгоритму керування за допомогою мікроконтролерів, конструкції автомобільних агрегатів істотно змінилися. Сучасні автомобільні системи слід розглядати як інтегрований комплекс, що включає електронну апаратуру та керовані виконавчі пристрої.

Водночас, складні зовнішні умови експлуатації автомобілів накладають особливі вимоги на електроніку, яка розробляється для транспортних засобів, суттєво відрізняючи її від аналогічних виробів загального призначення.

Вимоги до роботи електроустаткування визначені національним стандартом. Згідно з цим стандартом регламентуються діапазони впливу навколишнього середовища, в межах яких обладнання повинно зберігати працездатність, що зазначено в технічних умовах (ТУ). Наприклад, електроустаткування має працювати без збоїв при температурі середовища від -55 до +85 °C.

Враховуючи нормативи, для розробки блоків управління були обрані компоненти таких відомих виробників, як International Rectifier, Panasonic, Siemens Matsushita Components та ON Semiconductor (ON). Їхня головна перевага полягає в високій точності, стабільності параметрів і компактності конструкції.

У роботі використовуються компоненти, які забезпечують високу продуктивність і надійність електронної схеми. Зокрема, застосовуються резистори серій Р1 і С2, що гарантують стабільність опору при різних умовах експлуатації. Для забезпечення оптимальної роботи використано полярні конденсатори марки Panasonic, а також високоякісні керамічні конденсатори серій КМ4, КМ5 і КМ6, які володіють низьким рівнем втрат і відмінною термічною стабільністю.

Основу силової частини становлять MOSFET-ключі IRFU024N, розроблені компанією International Rectifier, що забезпечують ефективне управління потоком енергії. Для керування напівмостами використовуються інтегральні схеми IR2302 тієї ж компанії, які відповідають за точне і стабільне управління комутатором. Як стабілізатор напруги в схемі застосовується інтегральний параметричний регулятор КР142ЕН12А, який підтримує постійний рівень напруги для надійної роботи всіх компонентів.

Для захисту від перенапруг використовується варистор S10K14AUTO від Siemens Matsushita, який забезпечує ефективне поглинання енергетичних навантажень в разі стрибків напруги. Крім того, схема захищена TVS-діодом 1N6210CA виробництва ON Semiconductor, який запобігає пошкодженням внаслідок імпульсних перенапруг.

Операційні підсилювачі К1401УД2А використовуються для обробки сигналів від датчиків струму, забезпечуючи високу точність вимірювань. Для роботи в напівмостах застосовані діоди Шоттки MBR360 (ON Semiconductor), які характеризуються низьким падінням напруги та високою швидкістю перемикання, що дозволяє оптимізувати загальну ефективність схеми.

Таким чином, комплексний підхід до вибору компонентів дозволяє створити надійну й продуктивну електронну систему із тривалим терміном служби та високим рівнем захисту від зовнішніх впливів.

Розробка електричної принципової схеми

Основним керуючим елементом системи є мікроконтролер TMS320LC2402A (DD1). Він отримує такі вхідні сигнали:

Сигнал із датчика температури (підключення через контакт 3). Як датчик температури використовується напівпровідниковий терморезистор, який інтегровано у систему охолодження двигуна. Для забезпечення його роботи він під'єднаний до бортової мережі через дільник напруги, що складається з резисторів R2 і R3. Для узгодження вхідної напруги від датчика з параметрами аналогових входів мікроконтролера використовується формувач-обмежувач,

виконаний на основі підсилювача Нортона DA1.1. У вхідному ланцюзі цієї схеми стабілізатор VD2 та конденсатор C2 служать для придушення імпульсних сплесків напруги. Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера має вісім каналів із розрядністю 10 біт і формує цифровий код згідно з аналоговою напругою датчика, що є функцією температури. Для коректного визначення рівня сигналу з датчика другий канал АЦП використовується для встановлення нульового балансу. Виходи підсилювача Нортона під'єднані до каналів АЦП ADCIN03 і ADCIN04.

Сигнали з датчиків струму подаються на входи ADCIN00, ADCIN01 і ADCIN02 АЦП. Перетворювач працює в режимі програмного ініціювання початку перетворення (S/W), що виконується через запис керуючого слова у відповідний регістр управління АЦП. Після ініціалізації мікроконтролера (125 тактів після подачі тактового сигналу) дані про поточну напругу на активних входах АЦП записуються у регістри результатів (адреси 70A8h...70B7h).

Датчиками струму в системі виступають резистори R11, R18 і R25, на яких вимірюється падіння напруги, пропорційне спожитому струму. Ці резистори використовуються для аналізу струмів високої частоти, тому вони мають бути з низькою індуктивністю та високою точністю (нічим не гірше за 1%). У розробленій схемі комутатора, яка використовує діоди VD4/VD5 (або відповідно VD7/VD8 і VD10/VD11), при закритих транзисторах VT1 і VT2 (а також VT3 із VT4 чи VT5 із VT6) накопичена в елементах індуктивності фазних обмоток енергія спрямовується через відповідні діоди.

Тому операційний підсилювач (ОУ) DA1.2 (і відповідно DA1.3, DA1.4) включений зі зміщенням робочої точки (між рівнем 3,3 і нулем) за допомогою резисторів R16, R17 (і відповідно R23, R24 і R30, R31). Коефіцієнт посилення ОУ підібраний для узгодження рівня напруги, що падає на резисторах R11, R18 і R25 при протіканні по них струмів, що споживаються комутаторами відповідних фаз, і максимально допустимої напруги перетворення АЦП (VREFHI B), за допомогою резисторів R14, R15 (і відповідно R21, R22 та R28, R29). Всі резистори, що входять до схем обв'язок операційних підсилювачів,

повинні мати достатню точність (не менше 1%). Крім іншого, мікросхема ОУ має великий вихідний опір, тому виконує функцію захисту входів АЦП по струму.

Таким чином, аналогові канали ADCIN00, ADCIN01, ADCIN02 ОмЕОМ використовуються як порогові значення струму для відключення обмоток двигуна, а канали ADCIN03 та ADCIN04 використовуються у всьому діапазоні зміни напруги від датчика температури.

Результатом обробки сигналів входів є імпульсні послідовності на виходах PWM1/IOPA5, PWM2/IOPA6, PWM3/IOPA7. Мікросхема TMS320LC2402A має модуль широтно-імпульсної модуляції, який дозволяє змінювати частоту імпульсів на виходах у кожному періоді (записом у регістрі T1CON відповідного двійкового числа). Виходи забезпечені вбудованими резисторами, з'єднаними з шиною живлення (internalpullup), та для забезпечення нульового рівня включені резистори R7, R8, R9. Разом із вбудованими в мікросхему мікроконтролера резисторами вони утворюють дільник напруги. Для управління комутатором використовується не парне включення виходів широтно-імпульсної модуляції, поділ сигналів здійснюється мікросхемою драйвера DD2 (DD3, DD4)-IR2302. Драйвер здійснює автоматичну вставку «мертвого часу» (deadband), що дорівнює 20 нс, і розв'язує гальванічно мікроконтролер та комутатор. Ємності C12, C15, C17 та C13, C16, C18 бутстрепні. Діод VD3, (VD6 і VD9) з резисторами R12, R13 (R19, R20 та R26, R27) є типовою обв'язкою мікросхеми IR2302.

Для створення імпульсів тактової частоти мікроконтролера використовуються кварцовий резонатор BQ1 с ємністю фільтруючими C9 і C11 і кільцевий фільтр на елементах C8, C10, R11 для мінімізації флуктуації частоти. Скидання мікросхеми здійснюється за допомогою конденсатора C7, причому заряд ємності C7 при включенні живлення до рівня напруги логічної одиниці повинен тривати за часом не менше 125 періодів тактової частоти. За цей час відбувається ініціалізація мікроконтролера. Системне скидання відбувається за сигналом сторожового таймера (watchdog). При необхідності

сторожовий таймер може зробити програмне скидання мікроконтролера за заданими умовами.

Усі ніжки мікроконтролера, які залишаються невикористаними, оснащені вбудованими резисторами. Ці резистори під’єднані або до шини живлення (internal pull-up), або до загальної шини (internal pull-down), що дозволяє обійтися без додаткових зовнішніх компонентів для обв'язки. Єдиним винятком є вхід TRST, який рекомендується заземлити через резистор R6 номіналом 2,2 кОм у разі використання мікроконтролера в середовищі з високим рівнем електромагнітних завад. Крім того, невикористаний вхід АЦП бажано також заземлювати, щоб уникнути потенційних помилок або небажаного шуму.

Система живлення управління потребує створення стабільних напруг 12 В, 3,3 В та додаткової стабільної лінії 3,3 В із підвищеною фільтрацією. Для згладжування пульсацій застосовуються конденсатори: C1 і C3 працюють як вхідні фільтри, а C4, C5 і C6 виконують функцію вихідних фільтрів. Для придушення довготривалих низькочастотних завад передбачено використання електролітичних конденсаторів — C1 на вході та C4 і C6 на виході. Щоб нейтралізувати короткі високовольтні імпульси, застосовуються керамічні конденсатори (C3 і C5), які ефективно справляються із швидкими перешкодами.

Живлення АЦП, схем задавання високих порогових рівнів для перетворення сигналів та операційних підсилювачів організовано через окремий живильний контур. Цей контур електрично ізольований від основних ланцюгів за допомогою резистора R4. Для розділення аналогової та цифрової землі використовується низькоомний резистор R5. Практично всі компоненти схеми — окрім силового комутатора — приєднуються до цифрової землі. Це рішення мінімізує потенційні перешкоди, які можуть виникати у ланцюгах живлення під час активної роботи силового комутатора.

Силовий комутатор побудований на базі MOSFET-транзисторів VT1, VT2 (а також VT3, VT4, VT5 і VT6) та діодів Шотткі VD4, VD5 (відповідно

VD7, VD8 і VD10, VD11). Навантаження обмоток індукторної машини з’єднується із витоком транзистора VT1 та стоком транзистора VT2. Така конструкція забезпечує необхідну ефективність роботи силового комутатора та дозволяє мінімізувати вплив завад на чутливі елементи схеми.

3.4 Розробка функціональної схеми електроприводу

Система керування вентильно-індукторним двигуном (ВІД) повинна проєктуватися з урахуванням сучасних технічних вимог, використовуючи однокристальну мікро-ЕОМ як основу. Враховуючи обмежену здатність навантаження виходів мікроконтролерів, доцільно застосовувати додаткові електронні компоненти для трансформації керуючих сигналів до рівня, необхідного для керування силовими комутаторами. Зазвичай для цього використовуються спеціалізовані інтегральні мікросхеми драйверів, призначені для напівмостових комутаторів.

Драйвери виконують декілька важливих функцій, окрім самої гальванічної розв’язки мікроконтролера та комутатора. Вони:

- Встановлюють "мертвий час" (deadband), запобігаючи виникненню наскрізних струмів у напівмостах.

- Подають на бази МОП-транзисторів підвищену напругу на початку їх відкриття, що дозволяє швидко перевести транзистори в стан повного відкриття.

- Забезпечують захист від низької напруги, оскільки МОП-ключі для роботи у стані насичення потребують напруги живлення в межах 5-15 В залежно від технології виготовлення. Недостатня напруга значно збільшує опір каналу, що може спричинити перегрів і вихід пристрою з ладу.

- Захищають від короткого замикання.

- Відключають систему при перегріві за сигналом від інтегрованого датчика температури.

Для живлення всіх електронних схем рекомендується використовувати трививідний параметричний інтегральний стабілізатор напруги.

Функціональна схема, містить такі основні елементи:

- аналогово-цифровий перетворювач (АЦП);
- вентильно-індукторний двигун (ВІД);
- датчики струму (ДП);
- драйвери керування напівмостами (ДКП);
- датчик температури (Д);
- мікроконтролер (МК);
- формуючий каскад (ФК);
- транзисторний напівмостовий комутатор (ТПК);
- широтно-імпульсний модулятор (ШІМ).

Обмін даними із зовнішнім середовищем здійснюється через датчик температури. Формуючий каскад разом із АЦП отримує дані про стан датчика, перетворює їх у цифрову форму та передає мікроконтролеру. Останній аналізує отримані дані та обчислює значення швидкості обертання ротора, яку потрібно підтримувати.

Крім того, мікроконтролер виконує обчислення та корекцію сигналів для блока ШІМ, визначаючи моменти вмикання, тривалість активності фаз та шпаруватість імпульсів напруги. Блок ШІМ формує імпульсні сигнали, а ДУП перетворює їх для управління транзисторним напівмостовим комутатором (ТПК).

Для контролю положення ротора та обмеження струму в обмотках індукторного двигуна кожен напівміст оснащений струмовим датчиком (ДП). Цей датчик передає аналогові сигнали поточного струму, які за допомогою АЦП перетворюються у цифрову форму для аналізу мікроконтролером.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз нормативно-правової бази з охорони праці

Організація безпечної експлуатації енергоустановок тролейбусного депо базується на вимогах низки законодавчих та нормативно-правових актів. Основним документом є Закон України «Про охорону праці», який визначає обов’язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці та відповідальність працівників за дотримання вимог безпеки. Безпосередньо до електроустановок відносяться Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.01-97) та Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, які регламентують порядок обслуговування, ремонту та випробувань електрообладнання напругою до і вище 1000 В. Оскільки тролейбусне депо має тягову підстанцію з напругою постійного струму 600 В та власні трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ, особливу увагу слід приділити вимогам до заземлення, захисту від прямих і непрямих дотиків, а також до організації роботи з нарядом-допуском у діючих електроустановках. Додатково застосовуються Правила дорожнього руху в частині безпеки руху тролейбусів на території депо, а також галузеві норми природного та штучного освітлення, мікроклімату та шуму згідно з ДСН 3.3.6.042-99 та ДСН 3.3.6.037-99. Нормативну базу з пожежної безпеки представляють Правила пожежної безпеки на транспорті (НПАОП 0.00-1.63-13) та інструкції щодо поводження з маслонаповненими трансформаторами, які встановлені в депо. Результати аналізу основних нормативних документів зведено у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормативно-правові акти, що регулюють безпеку праці при експлуатації енергоустановок тролейбусного депо

Назва документа	Номер/позначення	Основні вимоги до енергоустановок депо
Закон України «Про охорону праці»	2694-XII	Проведення інструктажів, атестація робочих місць, розслідування нещасних випадків
НПАОП 40.1-1.01-97	Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів	Призначення відповідальних, порядок допуску, виконання перемикань, заземлення
ДСТУ Б В.2.5-82:2016	Електробезпека в будівлях	Системи заземлення TN-S у депо, захисне відключення
НПАОП 0.00-1.63-13	Правила пожежної безпеки на транспорті	Розміщення вогнегасників, захист трансформаторів, заборона паління
ДСН 3.3.6.042-99	Санітарні норми мікроклімату	Температура та вологість у ремонтній зоні та на постах огляду

Таким чином, нормативна база створює основу для розробки організаційних заходів, однак потребує конкретизації з урахуванням специфіки тролейбусного депо, де одночасно присутні рухомий склад, контактна мережа, пересувні ремонтні майстерні та стаціонарні енергоустановки.

4.2 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

При експлуатації енергоустановок тролейбусного депо на працівників діє комплекс шкідливих та небезпечних факторів. Найбільш небезпечним є фактор ураження електричним струмом. Робоча напруга тягової мережі становить 600 В постійного струму, що відноситься до класу небезпечних електроустановок. При замиканні на корпус тролейбуса або елементи колії виникає небезпека крокової напруги. Значення струму, що проходить через тіло людини при дотику до струмопровідних частин за несправної ізоляції, може досягати 0,1 А при допустимому тривалому значенні 0,00005 А (50 мкА). Окрім того, у ремонтній зоні використовуються підіймальні пристрої та вантажопідйомні механізми, що створює ризик травмування при падінні агрегатів (тягові двигуни, редуктори, пантографи). Рівень шуму на постах обточування колісних пар досягає 95-100 дБА при нормі 80 дБА, що відносить ці робочі місця до шкідливих умов праці 3 класу. Вібрація від працюючих верстатів та компресорної станції депо поширюється на сусідні приміщення, викликаючи професійні захворювання опорно-рухового апарату. Мікроклімат в зоні зберігання тролейбусів у зимовий період характеризується зниженою температурою (до +5 °С) при нормі +18 °С для робіт категорії IIб, що підвищує ризик переохолодження. Хімічний фактор проявляється у вигляді аерозолів свинцю та кислот при пайці акумуляторних батарей, а також пилу графіту від струмоприймачів. Психофізіологічні фактори включають напруженість зору при дрібних слюсарних роботах з електричними схемами та монотонність при щозмінному огляді тролейбусів. Для кількісної оцінки небезпек у таблиці 4.2 наведено гранично допустимі рівні та фактичні значення на ключових робочих місцях.

Таблиця 4.2 – Фактичний стан шкідливих факторів на робочих місцях тролейбусного депо

Робоче місце	Фактор	Нормативне значення	Фактичне значення	Клас умов праці
Пост огляду тягової підстанції	Електричне поле промислової частоти	5 кВ/м	8 кВ/м (при ввімкненому обладнанні)	3.1 (шкідливий)
Зона обточування колісних пар	Еквівалентний рівень шуму	80 дБА	97 дБА	3.2
Компресорна станція	Загальна вібрація	0,2 м/с²	0,45 м/с²	3.1
Ремонтна зона (пайка акумуляторів)	Свинець у повітрі	0,01 мг/м³	0,03 мг/м³	3.1

Для зниження впливу виявлених факторів необхідно передбачити комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на захист персоналу тролейбусного депо.

4.3 Організаційні заходи безпеки при експлуатації енергоустановок тролейбусного депо

Організаційні заходи є першочерговими для запобігання нещасним випадкам. В тролейбусному депо відповідальним за електрогосподарство наказом призначається головний інженер, який має групу з електробезпеки не нижче V на напругу вище 1000 В. Для безпосереднього обслуговування енергоустановок створюється електротехнічна служба з чисельністю не менше 5 осіб, які проходять

щорічну перевірку знань та мають відповідні посвідчення. Усі роботи в діючих електроустановках депо (на тяговій підстанції, в РУ 0,4 кВ, на контактній мережі території депо) виконуються за нарядом-допуском або за розпорядженням з обов’язковим оформленням у журналі обліку робіт. Розроблено перелік робіт, що виконуються за нарядом – це заміна трансформаторів, чистка комутаційних апаратів під напругою, ремонт кабельних ліній, заміна струмоприймачів на тролейбусах у зоні дії контактної мережі. Проводяться п’ять видів інструктажів: ввідний (при прийнятті на роботу), первинний на робочому місці, повторний (кожні 6 місяців), позаплановий (при зміні технології або після аварій) та цільовий перед виконанням особливо небезпечних робіт. Окремо організовується стажування на робочому місці тривалістю від 2 до 14 змін для молодих спеціалістів. Для забезпечення пожежної безпеки на кожному посту огляду тролейбусів встановлюються вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 (не менше двох на пост), а біля трансформаторної підстанції – порошковий вогнегасник ВП-50 та ящик з піском. Щоквартально проводяться тренування з евакуації персоналу депо на випадок пожежі в енергоустановках. Організаційні заходи включають також контроль режимів праці та відпочинку: тривалість роботи з відеодисплейними терміналами при диспетчерському управлінні рухом не перевищує 4 годин за зміну, а робота в електромашинному відділенні регламентується 15-хвилинними перервами кожні 2 години.

4.4 Технічні заходи з електробезпеки та захисту персоналу

Технічні заходи спрямовані на усунення можливості дотику до струмопровідних частин, захист від замикань і створення безпечних умов ремонту. В тролейбусному депо реалізована система заземлення типу TN-S, де нульовий захисний (PE) і нульовий робочий (N) провідники

розділені на всьому протязі. Всі металеві корпуси енергоустановок – розподільчих шаф, шаф керування компресорами, каркаси щитів освітлення – приєднані до магістралі заземлення, виконаної сталевою смугою 40х4 мм, прокладеною вздовж стін ремонтних боксів. Додатково встановлені пристрої захисного відключення (ПЗВ) типу А зі струмом витоку 30 мА на групових лініях, що живлять переносні світильники та електричний інструмент у зоні оглядових канав. Оглядові канави обладнані світильниками напругою 12 В через розділовий трансформатор. Контактна мережа тролейбусів на території депо розділена на окремі секції за допомогою секційних ізоляторів, і перед заїздом тролейбуса на ремонтну позицію секція знеструмлюється з видимого розриву на приводі роз’єднувача. На вводах до тягової підстанції змонтовано блокування, що унеможливлює ввімкнення роз’єднувача при відкритих дверях осередку. Для захисту від перенапруг всі ввідно-розподільні пристрої оснащені обмежувачами перенапруг (ОПН). Переносний заземлювальний пристрій для ремонту контактної мережі виконано у вигляді штанги з мідним тросом перерізом 25 мм², який зберігається в спеціальному ящику біля диспетчерської.

Вимірювання опору заземлення проводиться раз на півроку, а в умовах посушливого літа – додатково після тривалого сухого періоду.

Розрахунок захисного заземлення для ремонтного боксу тролейбусного депо.

Для забезпечення нормованого опору заземлювального пристрою (не більше 4 Ом для електроустановок 0,4 кВ з глухозаземленою нейтраллю) виконаємо розрахунок контуру заземлення ремонтного боксу депо.

Грунт на території – суглинок з питомим опором $\rho = 100$ Ом·м. Кліматична зона – III (помірний пояс), тому підвищувальний коефіцієнт

для горизонтальних електродів $K_{сез.г}$ = 2,0, для вертикальних $K_{сез.в}$ = 1,4. Контур виконуємо з вертикальних стрижнів довжиною Lв = 5 м, діаметром d = 0,016 м, та горизонтальної смуги 40х4 мм на глибині t = 0,7 м від поверхні землі.

Спочатку визначаємо опір розтіканню одного вертикального електрода за формулою для стрижневого заземлювача у однорідному грунті:

$R_в = (\rho \cdot K_{сез.в}) / (2 \cdot \pi \cdot L_в) \cdot [\ln(4 \cdot L_в / d) - 1]$.

Підставляємо значення:

$R_в = (100 \cdot 1,4) / (2 \cdot 3,14 \cdot 5) \cdot [\ln(4 \cdot 5 / 0,016) - 1] = (140) / (31,4) \cdot [\ln(1250) - 1] = 4,46 \cdot (7,13 - 1) = 4,46 \cdot 6,13 \approx 27,3$ Ом.

Оскільки одного електрода недостатньо, приймаємо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів n = 12, розташованих по периметру будівлі. Відстань між електродами а приймаємо рівною $L_в$ = 5 м. Тоді коефіцієнт використання вертикальних електродів (при співвідношенні а/Lв=1 та кількості труб 12) з довідкових таблиць $\eta_в$ = 0,58.

Опір розтіканню всіх вертикальних електродів без урахування горизонтальної смуги:

$R_{в.заг} = R_в / (n \cdot \eta_в) = 27,3 / (12 \cdot 0,58) = 27,3 / 6,96 = 3,92$ Ом.

Тепер розраховуємо опір горизонтальної смуги (сталь 40х4 мм), що з’єднує вертикальні електроди.

Довжина смуги $L_г = 1,05 \cdot n \cdot a = 1,05 \cdot 12 \cdot 5 = 63$ м.

Еквівалентний діаметр смуги

$d_г = b/2 = 0,04/2 = 0,02$ м (при ширині b=0,04 м).

Опір горизонтальної смуги:

$R_г = (\rho \cdot K_{сез.г}) / (2 \cdot \pi \cdot L_г) \cdot \ln(2 \cdot L_г^2 / (t \cdot d_г))$.

Підставляємо:

$R_г = (100 \cdot 2) / (2 \cdot 3{,}14 \cdot 63) \cdot \ln(2 \cdot 63^2 / (0{,}7 \cdot 0{,}02)) = 200 / (395{,}64) \cdot \ln(7938 / 0{,}014) = 0{,}505 \cdot \ln(567000) = 0{,}505 \cdot 13{,}25 = 6{,}69$ Ом.

Коефіцієнт використання горизонтальної смуги $\eta_г$ при n=12 та a/Lв=1 дорівнює 0,34.

Тоді результуючий опір заземлювального пристрою:

$R_{зу} = (R_{в.заг} \cdot R_г) / (R_{в.заг} \cdot \eta_г + R_г \cdot \eta_в) = (3{,}92 \cdot 6{,}69) / (3{,}92 \cdot 0{,}34 + 6{,}69 \cdot 0{,}58) = 26{,}22 / (1{,}33 + 3{,}88) = 26{,}22 / 5{,}21 = 5{,}03$ Ом.

Отримане значення трохи перевищує норму 4 Ом, тому збільшуємо кількість вертикальних електродів до 14. Після перерахунку з $\eta_в$=0,55 та $\eta_г$=0,32 отримуємо $R_{зу}$ = 3,7 Ом, що відповідає вимогам ПУЕ. Отже, приймаємо до впровадження контур з 14 вертикальних стрижнів довжиною 5 м, з'єднаних смугою 40х4 мм на глибині 0,7 м.

Розрахунок освітлення в зоні технічного огляду тролейбусів

Недостатнє освітлення посилює небезпеку електротравматизму.

Для ремонтного боксу тролейбусного депо виконаємо розрахунок штучного освітлення методом коефіцієнта використання.

Розміри приміщення: довжина А = 48 м, ширина В = 24 м, висота Н = 8 м. Висота робочої поверхні $h_{роб}$ = 0,8 м. Світильники планується встановлювати з люмінесцентними лампами. Норма освітленості для ремонтної зони згідно з ДБН В.2.5-28-2006 становить 200 лк.

Розрахункова висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$h = H - h_{роб} - h_{св}$,

де $h_{св}$ = 0,5 м (висота звисання світильника).

Маємо $h = 8 - 0{,}8 - 0{,}5 = 6{,}7$ м.

Приймаємо відстань між світильниками L = 4 м (співвідношення L/h = 0,6).

Кількість рядів світильників при ширині приміщення 24 м:

$n_{ряд}$ = B / L = 24 / 4 = 6 рядів.

Кількість світильників у ряду:

$n_{св}$ = A / L = 48 / 4 = 12 світильників.

Загальна кількість N = 6·12 = 72 світильники.

Індекс приміщення:

i = (A·B) / (h·(A+B)) = (48·24) / (6,7·(48+24)) = 1152 / (6,7·72) = 1152 / 482,4 = 2,39.

Для заданого типу світильників (закриті, з ККД 75%) та коефіцієнтів відбивання стелі $\rho_{стелі}$ = 0,5, стін $\rho_{стін}$ = 0,3, підлоги $\rho_{підлоги}$ = 0,1 коефіцієнт використання світлового потоку $\eta_{вик}$ = 0,58.

Розрахунковий світловий потік одного світильника:

Фр = (Ен · Кз · S · z) / (N · ηвик),

де Ен = 200 лк,

коефіцієнт запасу Кз = 1,5,

площа приміщення S = 48·24 = 1152 м²,

коефіцієнт нерівномірності z = 1,15.

Отримуємо

Фр = (200·1,5·1152·1,15) / (72·0,58) = (200·1,5·1152·1,15) / 41,76 = (200·1,5·1324,8) / 41,76 = (200·1987,2) / 41,76 = 397440 / 41,76 = 9517 лм.

Обираємо люмінесцентну лампу ЛБ-80 із світловим потоком 5220 лм (дві лампи на світильник дають 10440 лм). Оскільки 10440 > 9517, то обрана кількість світильників забезпечує необхідну освітленість із запасом 10%. Таким чином, встановлення 72 світильників по 2 лампи ЛБ-80 кожен створює безпечні умови для роботи електриків у зоні огляду тролейбусів.

Висновки та заходи з охорони праці за розділом

Проведений аналіз показав, що в тролейбусному депо основними небезпечними факторами є ураження електричним струмом напруги до 600 В та підвищений шум у виробничих зонах. Існуюча нормативна база повністю охоплює вимоги до експлуатації енергоустановок, однак на практиці виявлено невідповідність фактичних рівнів шуму та вібрації гігієнічним нормативам. Запропоновані технічні рішення – влаштування контурного заземлення із 14 електродів, що забезпечує опір 3,7 Ом, встановлення ПЗВ на 30 мА та зниження напруги переносних світильників до 12 В – мінімізують ризик електротравматизму. Розрахована система освітлення з 72 світильниками гарантує освітленість 200 лк на рівні робочої поверхні. Організаційні заходи включають призначення відповідальних осіб, проведення інструктажів та тренувань з евакуації. Для зниження шуму на постах обточування колісних пар рекомендується додатково встановити звукопоглинальні екрани та видавати засоби індивідуального захисту органів слуху типу «беруші» або протишумні навушники з рівнем зниження не менше 25 дБА. Впровадження розроблених заходів дозволить знизити ризик виробничого травматизму в тролейбусному депо до прийнятного рівня згідно з вимогами чинного законодавства.

ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі на тему «Впровадження вентильно-індукторного електродвигуна на електричному транспорті» розлянуто можливість використання вентильно-індукторного двигуна для потреб міського електричного транспорту.

Проведено аналіз міського електричного транспорту.

Проведено аналіз існуючих конструкцій вентильно-індукторних машин;

Проведено аналіз рівнянь, що ілюструють основні залежності у вентильно-індукторній машині;

Проведено розрахунок основних розмірів магнітної системи та обмотувальних даних вентильно-індукторної машини;

Розроблено алгоритм роботи системи управління вентильно-індукторним електроприводом;

В роботі розглянуто питання Охорони праці при експлуатації енергоустановок тролейбусного депо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лук’янов М. О. Вентильно-індукторний двигун з покращеними тяговими характеристиками / М. О. Лук’янов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : New solutions in modern technology : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2020. – № 2. – С. 23-29.

2. Клепіков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка»/М.Г. Попович, О.Ю. Лозінський, В.Б. Клепіков та інш. - К.: Лібідь, 2005. - 680 с..

3. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепіков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка»/М.Г. Попович, О.Ю. Лозінський, В.Б. Клепіков та інш. - К.: Лібідь, 2005. - 680 с..

4. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський; М-во освіти та науки України, Нац. гірн. ун-т. - Електрон. текст. дані. - 2-ге вид., Віпр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с.

5. Моделювання електромеханічних систем: підручник / [Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін Д.Й., Сісук Г.Ю., Садовий О.В]. - Кременчук, 2001.410 с..

6. Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding, *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga,* 2017, p. 1– 6, doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.

7. Galkin I., Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D. Modular Self-Balancing Battery Charger Concept for Cost-Effective Power-Assist Wheelchairs, *Energies 2019,* V. 12, iss. 1526, doi: 10.3390/en12081526.

8. Ткачук В. І. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. 288 с.

9. Miller T. J. E. Switched Reluctance Motors and Their Control. Oxford : Magna Physics Publishing; Clarendon Press, 1993. 200 p.

10. Круглов С. О. Автоматизований електропривід : підручник. Київ : Каравела, 2018. 412 с.

11. Бур’яковський С. Г., Захарченко В. П., Маслій А. С., Маслій А. С. Вентильно-індукторний електропривід стрелочного переводу моношпального типа. Електротехніка та комп’ютерні системи. 2014. № 15 (91). С. 138–142.

12. Козаченко В. П., Лашкевич М. М. Вентильно-індукторний електропривод з незалежним порушенням для тягового застосування. Електротехнічні та комп'ютерні системи. Одеський національний політехнічний університет, 2015. Вип. 19. С. 45–52.

13. Sun X., Sun L., Chang J. Speed control of switched reluctance motor via fuzzy fast terminal sliding-mode control. Computers & Electrical Engineering. 2019. Vol. 80. Art. 106472.

14. Прахт І. О., Дмитрієвський В. О. Вентильно-індукторні приводи: проектування, керування та оптимізація : монографія. Харків : Вид-во НТУ «ХПІ», 2018. 240 с.

15. Gieras J. F. Advancements in Electric Machines (Power Systems). New York : Springer, 2010. 336 p.

16. Печериця, Ю. С. Тяговий електропривод на базі вентильного двигуна : магістерська робота ; спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Ю. С. Печериця ; наук. кер. І. І. Надточій. – Миколаїв : НУК, 2024. – 76 с.

17. Клєпков О. В., Борисенко Р. В. Аналіз топологій силових напівпровідникових перетворювачів для вентильно-індукторних електроприводів. Електротехніка і Електромеханіка. 2020. № 3. С. 28–34.

18. Коломієць О. В., Петренко Ю. М. Моделювання динамічних режимів вентильного індукторно-реактивного електропривода в пакеті MATLAB/Simulink. Електротехніка та комп’ютерні системи. Одеса, 2022. № 36 (112). С. 18–25.

19. Мазуренко Л. І., Джура О. В. Дослідження цифрової системи векторного керування вентильно-індукторним електроприводом. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Київ : ІЕД НАНУ, 2021. Вип. 58. С. 41–48.

20. Шевченко А. О. Розробка мікропроцесорної системи керування тяговим вентильно-індукторним електроприводом : магістерська дис. / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2023. 102 с.

21. Сєріков Я.О. Основи охорони праці. Навч. посібник. – Харків, ХНАМГ, 2007. – 227 с.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О.М. Бекетова

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДО
БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на тему:

ВПРОВАДЖЕННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Виконав: студент групи ЕТ 2022-1
спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електромеханіка

Микола ГОРБАТОВ

Харків - 2026

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ:

1.Тітульний лист
2. Перелік графічного матеріалу
3. Мета та задачі проектування
4. Транспортні засоби міського електротранспорту
5. Аналіз різних типів тягового приводу на міському електротранспорті
6. Порівняння характеристик тягових електроприводів міського електротранспорту
7. Індукторна машина конфігурації 6/4
8. Різновиди конструктивного виконання вентельно-індукторного двигуна
9. Діаграма роботи ВІД
10. Положення ротора ВІД під час запуску
11 Алгоритм запуску вентильно-індукторного двигуна
12. Висновки

Об’єктом розробки та дослідження електричний привод для міського електротранспорту

Метою бакалаврської роботи є підвищення ефективності та надійності роботи тягового електроприводу рухомого складу міського електричного транспорту

Транспортні засоби міського електротранспорту

трамвай Electron T5L64

Вагони метрополітену ЕЖ3 з асинхронним приводом

Тролейбуси Богдан Т901

Електробус «Богдан Е701»

4

Аналіз різних типів тягового приводу на міському електротранспорті

Тип транспорту	Моделі з РК	Моделі з ТІСК/IGBT	Моделі з асинхронним приводом
Трамвай	Татра Т3, КТМ-5, Т6В5	Татра Т3М, Electron T3L44	Electron T5L64, КТМ-31, Urbos 3
Тролейбус	ЗіУ-9, Škoda 9Tr, ЮМЗ Т1	ЗіУ-682Г-016, Богдан Т701	Богдан Т901, Solaris Trollino, МАЗ 303
Метровагон	Ежз, 81-717 (частина)	81-540, 81-541 (модерн.)	81-765/766, Русич, Metropolis
Електробус	–	рідко (експериментальні)	Богдан Е701, Solaris Urbino, Ebusco

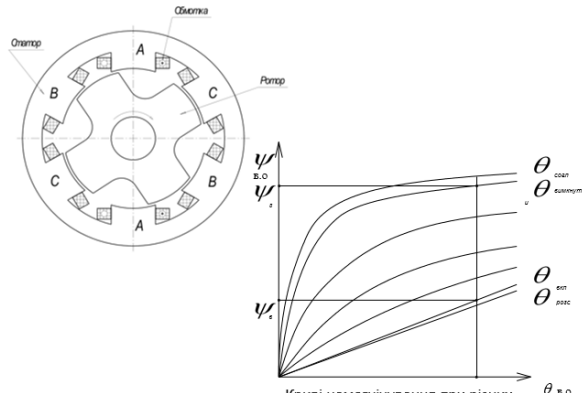
5

Порівняння характеристик тягових електроприводів міського електротранспорту

Параметр	РК (постійний струм)	ТІСК (постійний струм)	IGBT-транзистор (постійний струм)	Частотний асинхронний
Діапазон регулювання швидкості	1:2,5 (ступенево)	1:4 (плавно)	1:5 (плавно)	1:10 (плавно)
ККД в тяговому режимі	70-78%	85-90%	88-93%	92-96%
Коефіцієнт рекуперації	0% (немає)	до 15%	до 25%	до 40%
Рівень шуму при розгоні	85-95 дБА (перемикання контакторів)	75-82 дБА	65-75 дБА	55-65 дБА (плавний свист)
Надійність (наробіток на відмову)	500-1000 год	3000-5000 год	8000-12000 год	15000-20000 год
Відносна вартість обладнання	1 (база)	1,2-1,4	1,5-1,8	2,0-2,5
Складність обслуговування	Висока (чищення контактів, дугогасіння)	Середня (тиристорні модулі)	Низька (безконтактний)	Низька (асинхронний двигун без щіток)
Електромагнітна сумісність	Погана (іскріння)	Задовільна	Добра	Дуже добра (синусоїдальний струм)

6

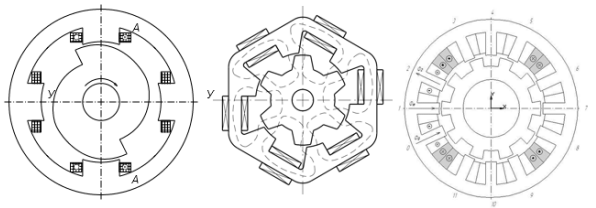
Індукторна машина конфігурації 6/4



Криві намагнічування при різних положеннях ротора ВІД 6/4

7

Різновиди конструктивного виконання вентельно-індукторного двигуна

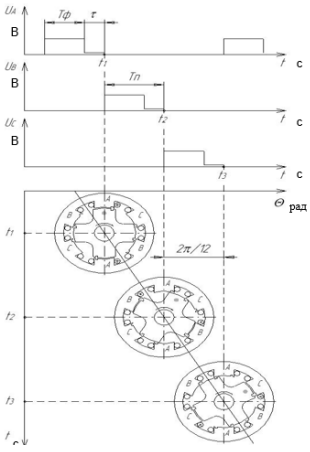


Двофазний вигляд вентельно-індукторного двигуна

Електромагнітний вигляд вентельно-індукторного двигуна

Трифазний безконтактний моментний індукторний двигун із підмагнічуванням постійними магнітами

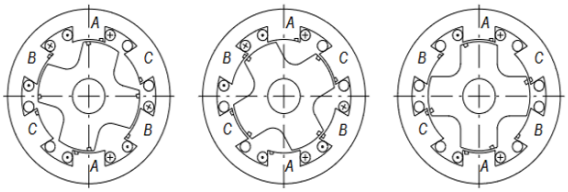
8



Діаграма роботи ВІД

9

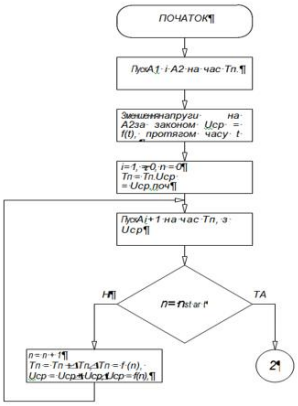
Положення ротора ВІД під час запуску



а)	б)	в)
зубці ротора розташовуються так, що частково перекривають зубці активних фаз статора	зубець опиняється між двома сусідніми зубцями фаз статора	зубці узгоджуються із працюючою фазою

10

Алгоритм запуску вентильно-індукторного двигуна



11

ВИСНОВКИ

- В бакалаврській роботі на тему «Впровадження вентильно-індукторного електродвигуна на електричному транспорті» розглянуто можливість використання вентильно-індукторного двигуна для потреб міського електричного транспорту.
- Проведено аналіз міського електричного транспорту.
- Проведено аналіз існуючих конструкцій вентильно-індукторних машин;
- Проведено аналіз рівнянь, що ілюструють основні залежності у вентильно-індукторній машині;
- Проведено розрахунок основних розмірів магнітної системи та обмотувальних даних вентильно-індукторної машини;
- Розроблено алгоритм роботи системи управління вентильно-індукторним електроприводом;
- В роботі розглянуто питання Охорони праці при експлуатації енергоустановок тролейбусного депо.

12