

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**РОЗРОБКА ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА ВЕНТИЛЯТОРА
СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ АВТОМОБІЛІВ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Віктор ШЕВЧЕНКО

гр. ЕТ 2022-1

Керівник:

Микола ХВОРОСТ

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.

ЗАВДАННЯ
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Шевченко Віктор Борисович

1. Тема роботи: **Розробка вентиляльно-індукторного двигуна вентилятора системи охолодження автомобілів**

керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи**Хворост М.В., 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 систем охолодження автомобіля

4.2. Аналіз вентиляльно-індукторного двигуна з бездатчиковим керуванням



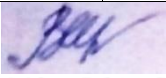

4.3 Розробка та розрахунок електричної схеми керування вентиляльно-індукторним двигуном

4.4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу

Результати аналізу систем охолодження автомобілей, 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	Микола ХВОРОСТ проф.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	В'ячеслав ШАВКУН, доц.		

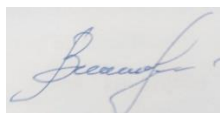
7. Дата видачі завдання

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



Віктор ШЕВЧЕНКО

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи



Микола ХВОРОСТ

РЕФЕРАТ

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вентильно-індукторний двигун, робочі характеристики, електропривод, моделювання.

В бакалаврській роботі на тему «Розробка вентильно-індукторного двигуна вентилятора системи охолодження автомобілів» розроблено систему керування вентильно-індукторним двигуном без датчика положення ротора для системи охолодження автомобілей.

В бакалаврській роботі для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання:

- розглянуто різні типи систем охолодження автомобілей;
- проаналізовано вже впроваджені моделі ВІД;
- проаналізовано основні залежності ВІД;
- було визначено обмотувальні дані, основні розміри магнітної системи;
- Було створено алгоритм роботи системи управління ВІД;
- підготовлена електрична принципова схема системи керування, як і було зроблено розрахунок її елементів;
- проведено розрахунок елементів електричної принципової схеми;

В роботі розглянуто питання Охорони праці при ремонті системи охолодження автомобілей.

Бакалаврська робота містить: *листів пояснювальної записки – 62, рисунків – 8, таблиць – 5.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. Аналіз систем охолодження автомобіля.....	8
1.1 Порівняння систем охолодження автомобіле.....	8
1.2 Аналіз переваг та недоліків різних типів систем охолодження.....	9
1.3 Методи діагностування системи охолодження.....	11
1.4 Аналіз несправностей системи охолодження та методи їх усунення.....	12
2. Аналіз вентильно-індукторного двигуна з бездатчиковим керуванням.....	15
2.1 Алгоритми керування вентильно-індукторним двигуном	15
2.2 Аналіз причин, затруднюючих використання вентильно-індукторних двигунів в автомобільному машинобудуванні	19
3. Розробка та розрахунок електричної схеми керування вентильно-індукторним двигуном.....	22
3.1 Розробка функціональної схеми електроприводу	22
3.2 Розробка електричної принципової схеми.....	27
3.3 Електромагнітний розрахунок вентильно-індукторного двигуна	31
4. Охорона праці.....	48
4.1 Аналіз нормативної бази з охорони праці при роботі з системами охолодження.....	48
4.2 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при роботі з системами охолодження.....	49
4.3 Організаційні заходи безпеки при експлуатації та ремонті систем охолодження.....	51
4.4 Технічні заходи безпеки в автомайстерні при роботі з системами охолодження.....	52
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ВСТУП

Сучасний автомобіль – це найскладніший комплекс різних систем. На сьогоднішній день процес розвитку автомобіля перманентний, створюються концепти з новими, неймовірно складними механізмами та агрегатами, проте зростають і вимоги щодо надійності транспортного засобу в цілому та його окремих вузлів. У той же час потенційний покупець бажає отримати автомобіль за менші гроші. Саме тому для збереження безбиткового виробництва сучасним автомобілям потрібне технологічне спрощення вже наявних вузлів і агрегатів, підвищення їх надійності і при цьому необхідно зберегти всю функціональність. Вирішити ці проблеми покликані наукові дослідження.

Відкриття Фарадеєм закону електромагнітної індукції, а також роботи Максвелла та Ленца послужили фундаментом для розвитку електричних машин. Однак перші зразки електричних машин на основі досліджень цих вчених з'явилися у середині XIX століття.

Сьогодні переважна більшість приводів на борту автомобіля виконана на основі колекторного електродвигуна постійного струму з збудженням від постійних магнітів, або рідше з електромагнітним збудженням.

До недоліків таких електродвигунів можна віднести наявність ковзних контактів (колектора та щіток), що є джерелами радіоперешкод і знижують надійність роботи в цілому. Двигун має складну конструкцію, а також досить дорогий в експлуатації.

Сьогодні ми можемо говорити, що електропривод – це показник ефективності енергозберігаючих технологій, оскільки, згідно зі статистичними даними, електричний двигун споживає близько 70% усієї енергії, що виробляється у світі. Тим більше, що автомобіль є автономним об'єктом і кількість енергії, що виробляється на його борту, обмежена можливостями генераторної установки та акумуляторної батареї.

Розробка високопродуктивних, компактних та економічних систем приводу – один із найпріоритетніших напрямків розвитку сучасної техніки.

Завдяки сучасним тенденціям розвитку мікроелектроніки та обчислювальної техніки, активно йде пошук нових, досконаліших конструктивних рішень безконтактних двигунів постійного струму (БДПТ), що керуються цифровими електронними пристроями. Все різноманіття конструктивних і технологічних моделей нових електричних машин обумовлюється такими факторами:

- можливість використання будь-якого алгоритму управління.
- баланс між відносною рентабельністю та експлуатаційними показниками.

З різноманіття видів БДПТ малої та середньої потужності в даний час інтенсивно розвиваються та вдосконалюються два типи БДПТ: із збудженням від постійних магнітів (ПМ) та з самозбудженням, що володіють електромагнітною редукцією частоти обертання ротора.

До першого типу БДПТ відносяться в загальному випадку два види електродвигунів з m -фазними обмотками управління: з ПМ у повітряному зазорі та з ПМ у магнітопроводі ротора або статора. До другого типу БДПТ належать вентильні індукторно-реактивні двигуни (ВД) з m -фазними обмотками самозбудження-управління.

ВД для нормальної роботи вимагає у своєму складі датчик положення ротора (ДПР). Крім цього, через конструктивні особливості, ВІД необхідний складний алгоритм управління, і його реалізація на дискретних елементах досить не технологічна. Однак на сьогоднішній день досягнення мікропроцесорної техніки істотно підвищують рентабельність електроприводу, цьому більшою мірою сприяє рішення відмовитися від ДПР, замінивши його на програмний аналог.

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ АВТОМОБІЛІВ

Система охолодження є однією з ключових допоміжних систем сучасного автомобіля, оскільки вона забезпечує підтримання оптимального теплового режиму двигуна та інших агрегатів. Від її ефективності залежать ресурс двигуна, його потужність, економічність та токсичність відпрацьованих газів. У даному підрозділі розглянуто різні типи систем охолодження з точки зору їх електроприводів, проведено аналіз їх переваг і недоліків, наведено методи діагностування, типові несправності та способи їх усунення, а також виконано інженерні розрахунки.

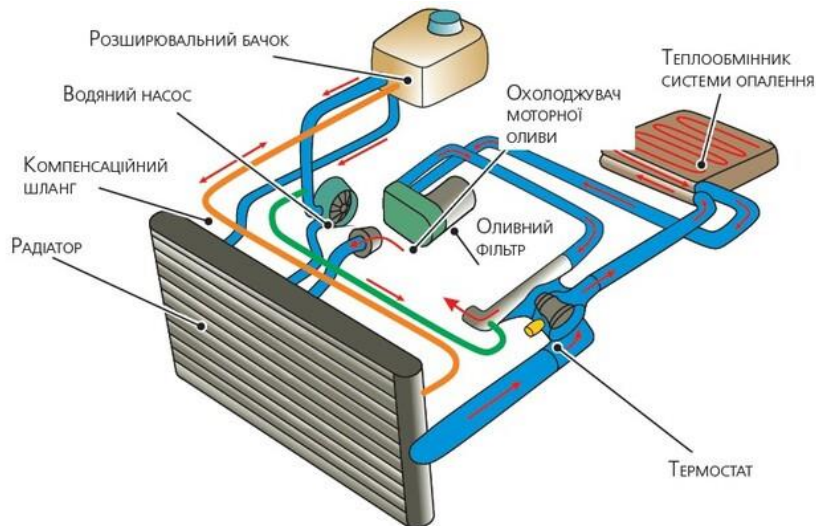


Рисунок 1.1 – Система охолодження автомобіля

1.1 Порівняння систем охолодження автомобілей

За принципом дії системи охолодження поділяються на рідинні (закритого типу з примусовою циркуляцією) та повітряні. У сучасних легкових і вантажних автомобілях домінують рідинні системи, проте повітряне охолодження іноді застосовується на спецтехніці. З точки зору електроприводу, найбільший інтерес представляють компоненти, що приводяться в дію електричними двигунами: електровентилятори радіатора, електричні насоси додаткового охолодження (наприклад, для

турбокомпресора, EGR, кондиціонера), а також електроприводи заслінок жалюзі радіатора.

Розглянемо три основні схеми побудови електроприводу вентилятора системи охолодження:

1. Прямий електропривід постійного струму (одно- або двошвидкісний). Вентилятор жорстко закріплений на валу електродвигуна. Швидкість обертання змінюється подачею напруги через додаткові резистори (для зниження швидкості) або за допомогою реле. Застосовується на бюджетних автомобілях.

2. Електропривод з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Дозволяє плавно регулювати швидкість вентилятора від 0 до максимуму. Використовується на сучасних автомобілях із блоком керування двигуном (ECU). Двигун – колекторний або безколекторний (вентильний).

3. Електропривод з безколекторним (вентильним) двигуном (BLDC). Поєднує ШІМ-регулювання з високим ККД, низьким рівнем шуму та великим ресурсом. Часто інтегрується в модуль вентилятора з власним контролером.

Окрім вентилятора, важливим елементом є електричний водяний насос. У традиційних системах насос приводиться від колінчастого вала через пас, але в гібридних і деяких сучасних бензинових двигунах (з функцією stop-start) використовується електронасос. Він дозволяє продовжувати циркуляцію рідини після вимкнення двигуна (для охолодження турбіни) та працювати незалежно від частоти обертання двигуна.

1.2 Аналіз переваг та недоліків різних типів систем охолодження

У таблиці 1.1 зведено порівняльну характеристику систем залежно від типу приводу основних компонентів.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки різних типів електроприводів систем охолодження

Тип електропривода	Переваги	Недоліки
Одношвидкісний (релейний)	Простота, низька вартість, надійність	Висока енергоємність при роботі на повній швидкості, стрибки струму, шум, неможливість точного регулювання температури
Двошвидкісний з резисторами	Дешевший за ШІМ, два фіксовані режими (тихий/потужний)	Низький ККД на зниженій швидкості (резистор гріється), недостатня гнучкість
ШІМ-регульований (колекторний двигун)	Плавна зміна продуктивності, зниження споживання енергії (~30% проти релейного), менший акустичний дискомфорт	Потреба в силовому транзисторі та радіаторі, додаткові витрати на екранування від перешкод, знос щіток
Безколекторний (BLDC) з ШІМ	Найвищий ККД (до 85-90%), безшумність, довговічність (немає щіток), точне позиціонування, можливість рекуперації	Висока вартість, складна електроніка керування, потребує зворотного зв'язку за положенням ротора
Електричний насос замість механічного	Незалежність від обертів двигуна, робота на стоянці з вимкненим ДВЗ, покращення прогріву салону, зниження витрат палива (~1-2%)	Вартість, додаткове навантаження на електромережу (потужність до 200-300 Вт)

З екологічної точки зору, застосування електроприводів з ШІМ та BLDC дозволяє зменшити споживання електроенергії, а отже, і палива (або збільшити запас ходу електромобіля). Для електромобілів система охолодження батарей і силової електроніки – критична, і там використовуються виключно BLDC вентилятори та насоси з плавним регулюванням.

1.3 Методи діагностування системи охолодження

Діагностування системи охолодження з електроприводами проводиться за допомогою візуального огляду, вимірювальних приладів (мультиметр, осцилограф, струмові кліщі) та діагностичних сканерів (для зчитування кодів несправностей від ECU).

Основні методи:

1. Перевірка працездатності вентилятора:

- подача напруги безпосередньо на двигун від акумулятора (через запобіжник). Оцінка швидкості та сторонніх шумів.
- Для ШІМ-керуваних – перевірка наявності ШІМ-сигналу (частота 100-500 Гц, шпаруватість) за допомогою осцилографа на сигнальному проводі.
- Вимірювання струму споживання: у справного двигуна струм плавно зростає при запуску, не перевищує номіналу більш ніж на 15%.

2. Перевірка електричного насоса:

- Прослуховування роботи (жужжання) при включенні запалювання (у деяких автомобілях насос працює короткочасно для пост-продувки).
- Вимірювання опору обмоток (зазвичай 0,5-3 Ом); коротке замикання або обрив свідчать про несправність.

3. Діагностування датчиків температури: Порівняння показників датчика з еталонним термометром у водяній бані. Перевірка опору при 20, 80, 100 °С.

4. Перевірка реле та запобіжників: Продзвонювання реле, перевірка падіння напруги на контактах (не більше 0,2 В).

5. Сканерна діагностика: Зчитування кодів P0480, P0481 (проблеми з вентилятором), P2681, P2682 (електронасос). Моніторинг температури ОЖ та сигналу ШІМ в реальному часі.

6. Гідравлічні випробування: Перевірка тиску в системі (тестером), герметичності радіатора та розширювального бачка. Падіння тиску вказує на витік.

1.4 Аналіз несправностей системи охолодження та методи їх усунення

Найпоширеніші несправності в системах охолодження з електроприводом наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Несправності, причини та методи усунення

Несправність	Ймовірна причина	Метод усунення
Вентилятор не вмикається при перегріві	Перегорів запобіжник або реле несправне	Заміна запобіжника/реле, перевірка живлення
	Обрив або замикання в моторі вентилятора	Перевірка омметром: заміна двигуна або щіток
	Несправний датчик температури або ШІМ-контролер	Діагностика датчика/контролера, заміна
Вентилятор працює безперервно на максимальній швидкості	Обрив сигнального проводу ШІМ (ЕСU бачить 12 В або 0 В як команду max)	Відновлення контакту, заміна дроту
	Заклинювання реле в увімкненому стані	Заміна реле
	Помилка в прошивці ЕСU (рідко)	Перепрошивка або заміна ЕСU
Підвищений шум, вібрація вентилятора	Знос підшипників або дисбаланс крильчатки	Заміна вентилятора в зборі або підшипників
	Потрапляння стороннього предмета	Видалення предмета, перевірка цілісності крильчатки
Перегрів двигуна, хоча вентилятор працює	Недостатня продуктивність (знос щіток, зниження обертів)	Заміна двигуна або щіток, перевірка напруги живлення
	Забруднений радіатор (зовні або всередині)	Промивка радіатора, чистка комірок
	Повітряна пробка	Видалення повітря, перевірка кришки розширювального бачка
Електронасос не створює циркуляцію	Засмічення або блокування ротора	Розбирання, очищення, заміна насоса
	Вихід з ладу обмоток (обрив)	Заміна насоса
Постійно горить лампа перегріву, але температура нормальна	Замикання датчика температури	Заміна датчика

Розрахункові співвідношення для підбору електропривода

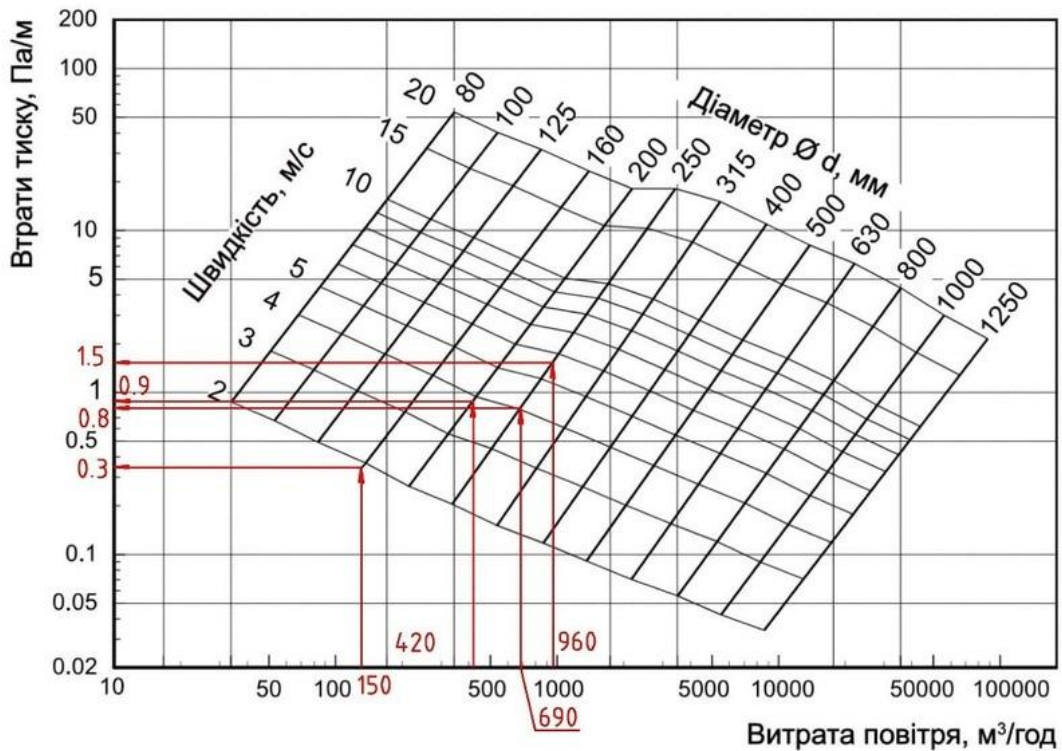


Рисунок 1.2 – графік визначення вентилятора за тиском і продуктивністю

Для обґрунтованого вибору електродвигуна вентилятора або насоса необхідно виконати тепловий та аеродинамічний розрахунок.

Вихідні дані для розрахунку вентилятора системи охолодження (приклад для легкового автомобіля):

- Максимальна тепловіддача радіатора $Q = 50$ кВт (для двигуна потужністю 100 кВт).
- Різниця температур повітря на вході та виході з радіатора $\Delta T = 25$ °С.
- Щільність повітря $\rho = 1,2$ кг/м³.
- Питома теплоємність повітря $c_p = 1005$ Дж/(кг·К).

Необхідна масова витрата повітря:

$$G_{\text{пов}} = Q_{\text{ср}} \cdot \Delta T = 50000 \cdot 1005 \cdot 25 \approx 1,99 \text{ кг/с.}$$

$$G_{\text{пов}} = c_p \cdot \Delta T Q = 1005 \cdot 25 \cdot 50000 \approx 1,99 \text{ кг/с.}$$

Об'ємна витрата:

$$V_{\text{пов}} = \rho \cdot G_{\text{пов}} = 1,991,2 \approx 1,66 \text{ м}^3/\text{с} = 6000 \text{ м}^3/\text{год.}$$

За каталогом вентиляторів вибираємо осьовий вентилятор діаметром 350 мм з подачею 6000 м³/год при статичному тиску ~150 Па.

Потужність, що споживається вентилятором:

$$P_{\text{мех}} = \eta_{\text{вен}} \cdot V_{\text{пов}} \cdot \Delta p,$$

де $\eta_{\text{вен}} \approx 0,4$ для автомобільних вентиляторів.

$$P_{\text{мех}} = 1,66 \cdot 1500,4 \approx 622 \text{ Вт.}$$

Електрична потужність з урахуванням ККД електродвигуна (для BLDC $\eta_{\text{дв}} = 0,85$):

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{дв}} = 6220,85 \approx 732 \text{ Вт.}$$

Струм споживання при напрузі бортової мережі 14 В:

$$I = P_{\text{ел}} \cdot U = 73214 \approx 52 \text{ А.}$$

Такий струм вимагає силового реле або транзисторного ключа на 60 А.

Для електричного насоса охолодження (замість механічного) вигреш у потужності можна оцінити: механічний насос на високих обертах двигуна споживає до 2-3 кВт, тоді як електронасос працює лише за потреби і споживає в середньому 100-200 Вт, що знижує витрату палива на 0,2-0,5 л/100 км.

Сучасні системи охолодження автомобілів дедалі частіше використовують регульовані електроприводи (ШИМ та BLDC) замість механічних або релейних схем. Це дозволяє підвищити паливну економічність, зменшити шум та забезпечити гнучке керування тепловим режимом. Наведені в розділі методи діагностування дозволяють швидко виявляти типові несправності (перегорання реле, знос щіток, обрив обмоток, несправність ШИМ-контролера), а розрахунки – обґрунтовано підбирати компоненти. Подальший розвиток пов'язаний із інтеграцією електроприводів до єдиної системи термоменеджменту з інтелектуальним прогнозуванням.

2. АНАЛІЗ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ З БЕЗДАТЧИКОВИМ КЕРУВАННЯМ

2.1 Алгоритми керування вентиляльно-індукторним двигуном

Електронний блок керування залежно від призначення індукторної машини (ІМ) може реалізовувати різні алгоритми керування.

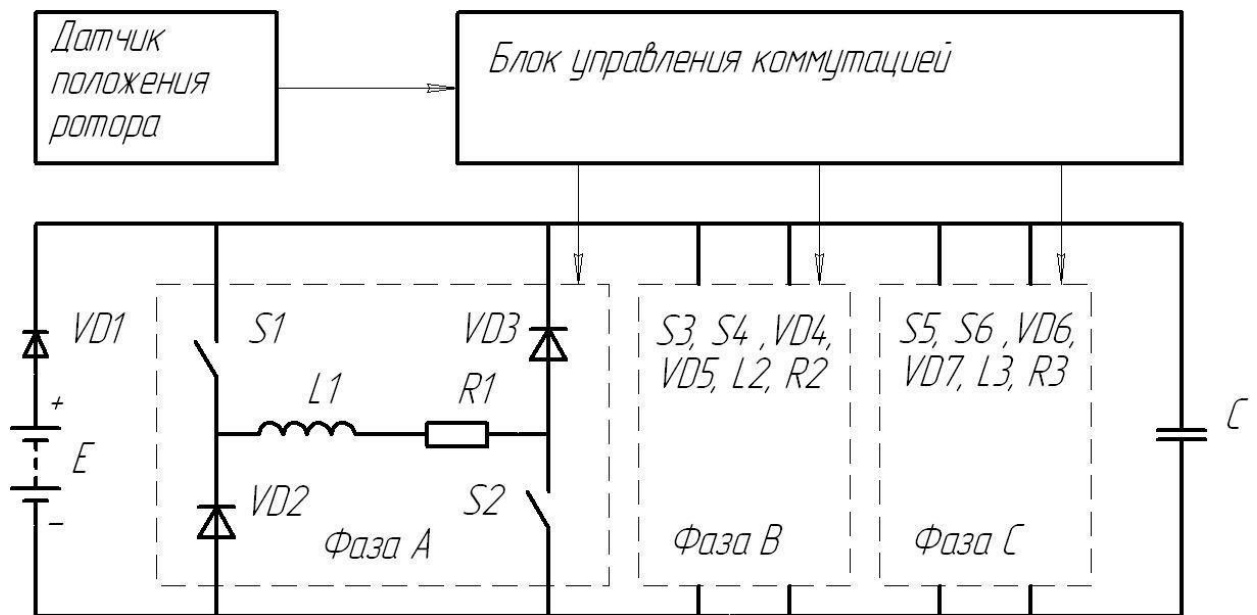


Рисунок 2.1 – Електронний блок керування

Вибираючи вид управління, ми повинні враховувати діапазон частоти обертання та допустимий рівень пульсації крутного моменту. Від 0 до 200 хв-1 -діапазон низьких обертів ротора, від 200 до 500 хв-1 – діапазон середніх частот, від 500 до 1000 хв-1 – діапазон високих частот. Які ж бувають способи управління ІМ:

а) широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) напруги (в основному для низьких частот обертання). Буває жорстким і м'яким, з розфоруванням і без розфорування відповідно. Даний спосіб передбачає харчування фази імпульсами напруги з постійною шпаруватістю, форма струмової хвилі зображена рис. 2.2, а;

б) широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) струму (для низьких швидкостей та великих моментів). Даний спосіб передбачає наявність датчика струму, за допомогою якого величина струму у фазі, досягаючи уставки, стає постійною, а при наближенні до узгодженого положення зубців гаситься (рис. 2.2, б).

в) Фазове регулювання (середні та високі частоти обертання). У цьому способі згідно з частотою обертання визначається, коли потрібно підключати обмотку наступної фази. До того, як величина струму не приймає значення, що дорівнює нулю в положення зубців “узгодженому” (рис. 2.2, в), подається напруга. Помітний вплив на форму струмової хвилі має проти-ЕРС (рис. 2.2, г), це зустрічається на високих швидкостях і може несприятливо позначатися на питомих показниках індукторної машини

г) Адаптування струмової хвилі (АТВ), на сьогоднішній день найперспективніший метод управління ІМ. Суть методу: у фазах створюються струми, сумарний момент цих струмів перманентний (коефіцієнт пульсацій дорівнює нулю) даного режиму. Метод реалізується системою «мікропроцесор – силові ключі» і є сукупністю алгоритмів розрахунку струмових хвиль для будь-якого можливого режиму роботи приводу. Застосування АТВ дає можливість значно знизити КПМ (коефіцієнта пульсацій моменту) до 1,16.

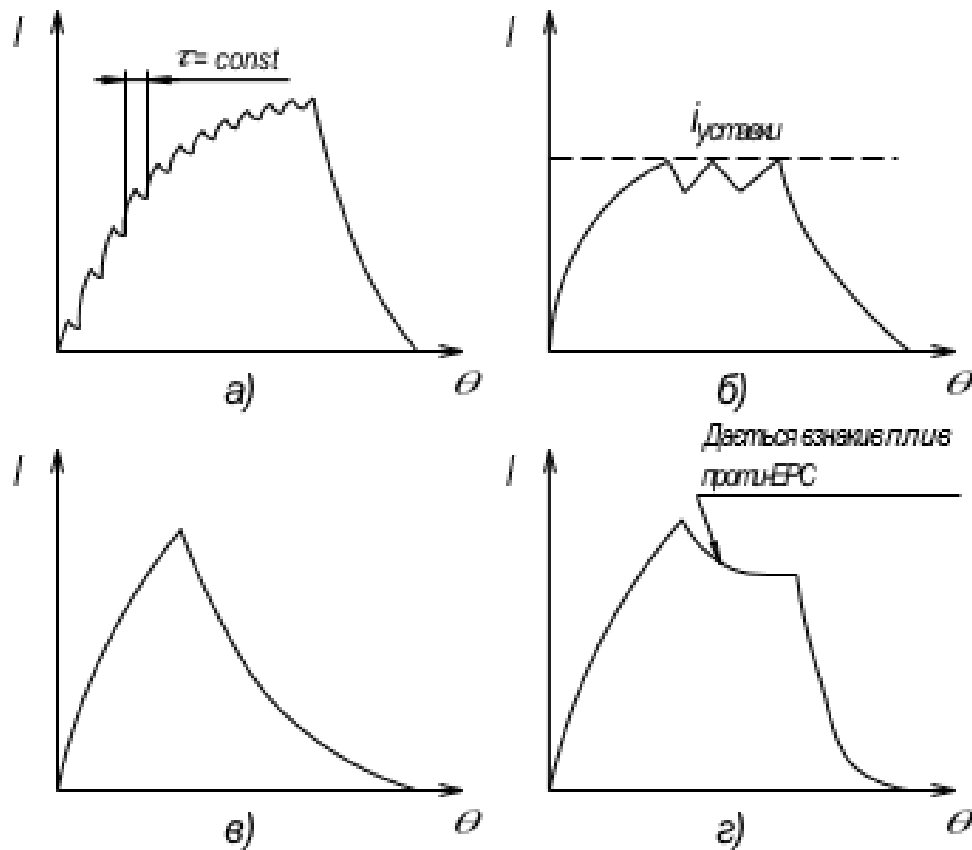


Рисунок 2.2 – Види керування індукторною машиною

Датчики положення ротора систем управління вентильно-індукторними машинами.

Датчик положення - визначають положення магнітної осі ротора та магнітної осі статора, еквівалентної їй. Також він видає необхідні команди схемою комутатора. У переважній кількості приводів використовуються датчики трьох типів: індуктивні, Холла та фотодатчики. Конструктивно, незалежно від типу, датчик є додатковою «надбудовою» на вільному кінці валу двигуна. Обов'язковим елементом є задатчик – зазвичай це диск із зубцями чи прорізами. Розглянемо окремо три зазначені типи датчика:

- ДПР індуктивного типу. Чутливий елемент - котушка, намотана на феромагнітний сердечник. Задатчик – зубчастий диск. Число зубців визначає точність визначення положення. Їхня кількість визначається умовою: ширина

міжзубцевого проміжку повинна в 2-3 рази перевищувати товщину магнітопроводу (сердечника) датчика (якщо використовуються дроселі насичення). Для збільшення точності встановлюються додаткові чутливі елементи, зрушені один від одного на кут.

Рівний

$$\gamma = \tau \cdot n + \tau/k,$$

де τ - зубцевий поділ диска, що задає,

n - ціле число,

k - Кількість чутливих елементів;

У цьому число імпульсів зростає пропорційно k . Недоліками даного датчика є: форма сигналу, відмінна від прямокутної (особливо це помітно на низьких швидкостях – з'являється ефект «брязкоту» у перемиканні комутатора); фазовий зсув на високих швидкостях (позначається вплив ЕРС самоіндукції); мала точність проти датчиками інших типів; велика матеріаломісткість датчика загалом (масивний диск, використання постійних магнітів (ПМ)). В даний час ДПР цього типу в нових розробках не використовується.

- ДПР з урахуванням ефекту Холла. Задатчик – діамагнітний диск з прорізами, перекривають магнітний потік від ПМ, встановленого напроти елемент Холла. Датчик виробляє прямокутні імпульси необхідної амплітуди (чутливий елемент та підсилювач сигналу виконані за гібридною технологією). Дозволяє досягти більшої точності, ніж під час використання індуктивного датчика. Використовується в більшості приводів, що розробляються.

- Оптичні ДПР. Як задатчик використовується прозорий диск зі штрихами, нанесеними методом фотолітографії. Диск своїми штрихами перекриває світловий потік, що надходить від світлодіода на приймач фотодіод. Оптичні датчики можуть містити кілька пар світлодіодів і фотодіодів за умови, що на диску зроблені прозорі сектори величиною, що

відповідають розряду кожної пари. Вони подають інформацію про вугілля в двійковому паралельному коді. Оптичні датчики мають найвищу точність і виконуються на відповідальних приводах.

2.2 Аналіз причин, затруднюючих використання вентиляльно-індукторних двигунів в автомобільному машинобудуванні

Вентильно-індукторний привід у вигляді своєї конструкції та принципу дії має низку переваг та недоліків. Позитивні якості ІМ переважно визначаються простотою конструкції електромеханічного перетворювача, його низькою вартістю і високою надійністю. Оскільки обмотки статора виконані зосередженими, стають неможливими замикання між фазами. Витрата міді мала, т.к. ротор немає обмотки. ІМ здатна розвивати великі моменти і має високий ККД, що дозволяє використовувати дані електричні машини у складі високомоментних, безредукторних приводів. Недоліком ВІД є високі значення пульсацій крутного та пускового моментів, обумовлені принципом дії ВІД. Необхідно звернути увагу на те, що цей недолік є серйозною проблемою, т.к. складається з низки чинників. Перерахуємо їх у порядку зменшення значимості:

- кількість фаз машини (конфігурація). Зі збільшенням числа фаз пульсації знижуються. При збільшенні числа фаз зростає "перекриття" включення фаз, діаграма сумарного моменту виходить більш рівною (близькою до прямої). Використання великої кількості фаз (більше чотирьох) розширює можливості алгоритмів адаптування струмової хвилі.

- Кутова частота обертання ротора. На середніх швидкостях пульсації моменту вище, ніж низьких, це пояснюється обмеженими можливостями формування струмової хвилі (зазвичай використовується фазове регулювання). На високих швидкостях пульсації знижуються, т.к. стає помітним вплив проти-ЕРС на форму струмової хвилі, змінюючи їх у більш сприятливу (з погляду пульсацій моменту) бік.

- Використання алгоритмів адаптування струмової хвилі. При використанні даного методу розробник може закладати більш низькі значення коефіцієнта пульсації. В ідеалі алгоритми АТВ дозволяють отримати нульові пульсації моменту, проте на практиці поки не вдається врахувати всіх факторів, що впливають на форму струмової хвилі (насичення, проти-ЕРС, відхилення параметрів напруги від номінальних). Утруднено отримання самих алгоритмів, через недостатність теоретичних викладок з ІМ.

- Орієнтація отримання максимально можливого моменту. При отриманні максимального миттєвого моменту необхідно, щоб піки струму і швидкості зростання індуктивності (перша похідна фази індуктивності за часом) збіглися, при цьому значно зростають пульсації. При отриманні низьких пульсацій моменту потрібно, щоб струм фази досяг свого максимуму до проходження зони інтенсивного зростання індуктивності, що зменшує ККД.

- Можливість інвертування напруги дозволяє більш тонко змінювати форму струмової хвилі, отримуючи нижчі пульсації моменту.

Особливо позначається цей чинник на високих швидкостях, коли струм при нормальному управлінні (без розфорсування) доводиться або знижувати (інакше він не встигає впасти до нуля при проходженні зубцями узгодженого становища), або додатково закладати вищі значення пульсації моменту, т.к. енергія, що залишилася, запасена в обмотці, витрачається на створення гальмівного моменту.

Бездатчиковое управління ВИД цілком застосовно, оскільки ми можемо замінити датчик положення ротора, визначенням положення магнітної осі ротора і магнітної осі статора, еквівалентної їй, і видачею відповідних команд керувати схемою комутатора. Тобто. датчик здатний контролювати комутацію найскладніших систем, як описано, датчик кута повинен мати оптимальне число міток на оборот, щоб була можливість отримувати з нього переривання для управління кутом включення/відключення. Тим не менш, саме такий датчик є "камнем спотикання" для безконтактних машин. Тому зробити

систему керування кутом комутації на основі малого числа імпульсів, не прив'язаних до моментів включення/відключення фаз є важливим та пріоритетним завданням. Насправді, у такій системі датчик положення сильно спрощується, т.к. для основної системи стає інформація про швидкість обертання ротора. При вирішенні цієї проблеми слід враховувати ту важливу обставину, що перетворення енергії на ВІД відбувається дискретно, протягом кроку, отже, мають місце пульсації моменту. Очевидно алгоритм управління повинен враховувати зміну швидкості протягом кроку, для точного обчислення кута комутації. Одним із недоліків ВІД є високий рівень шуму. Справа в тому, що для цього класу приводів велика вібраційна складова акустичного шуму. Вібрація виникає внаслідок імпульсного створення крутного моменту та електромагнітних сил, вектор яких перетинає вісь обертання ротора (виникають коливання ротора в опорах). Отже, потрібно оптимізувати закон комутації, як введенням зон спільної роботи фаз, так і підбором форми струмової хвилі, при якій вібрації. Виходячи з вище викладеного, можна сформулювати цілі та завдання дослідження.

Метою цього дипломного проекту є розробка системи управління вентильно-індукторним двигуном без датчика положення ротора.

У вирішенні цього завдання допоможуть:

- дослідження вже раніше впроваджених моделей ВІД;
- дослідження існуючих видів бездатчикового управління вентильно-індукторним двигуном;
- розробка методики розрахунку основних розмірів магнітної системи та обмотувальних даних вентильно-індукторної машини;
- впровадження алгоритму роботи системи управління вентильно-індукторним електроприводом;
- впровадження функціональної та електричної принципової схеми системи управління та розрахунок її елементів.

3. РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИМ ДВИГУНОМ

3.1 Розробка функціональної схеми електроприводу

З урахуванням сучасних стандартів мікроелектроніки розробка системи управління ВІД повинна ґрунтуватися на однокристальній мікро ЕОМ. Мета даного дипломного проекту - розробка системи з бездатчиковим керуванням ВІД, тому становище ротора буде визначатися на основі обробки даних з струмових датчиків. Для живлення обмоток індукторної машини обрано схему напівмостового комутатора, тому що при мінімальній вартості самого комутатора вона дозволяє отримати найбільший ккд. У зв'язку з тим, що виходи мікроконтролерів досить обмежені за своєю здатністю навантаження, будуть додані додаткові схеми, що перетворюють сигнали управління силовим комутатором. У разі зазвичай використовують драйвера. Їхня мікросхема буде розв'язувати комутатор і мікроконтролер а також: встановлює так званий «мертвий час» (deadband), його завдання - виключення наскрізних струмів у напівмостах; як тільки МОП транзисторів починає відкриватися, на їх бази подається підвищена напруга, що дає можливість швидко перейти в повністю відкритий стан; щоб захиститися від зниженої напруги та короткого замикання, активуються схеми захисту включає схеми захисту від зниженої напруги; у разі перегріву надходить сигнал від вбудованого датчика температури на схему відключення. Для живлення використовуватиметься трививідний, параметричний, інтегральний стабілізатор напруги.

Функціональна схема зображено рис.3.1

Функціональна схема включає такі елементи:

- ВІД - вентильно-індукторний двигун;
- ДП – датчики струму;
- Д – датчик температури;

- МК – мікроконтролер;

- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
- ШИМ – широтно-імпульсний модулятор;
- ФК - формує каскад;
- ТПК - транзисторний напівмостовий комутатор;
- ДУП - драйвера управління напівмостами.

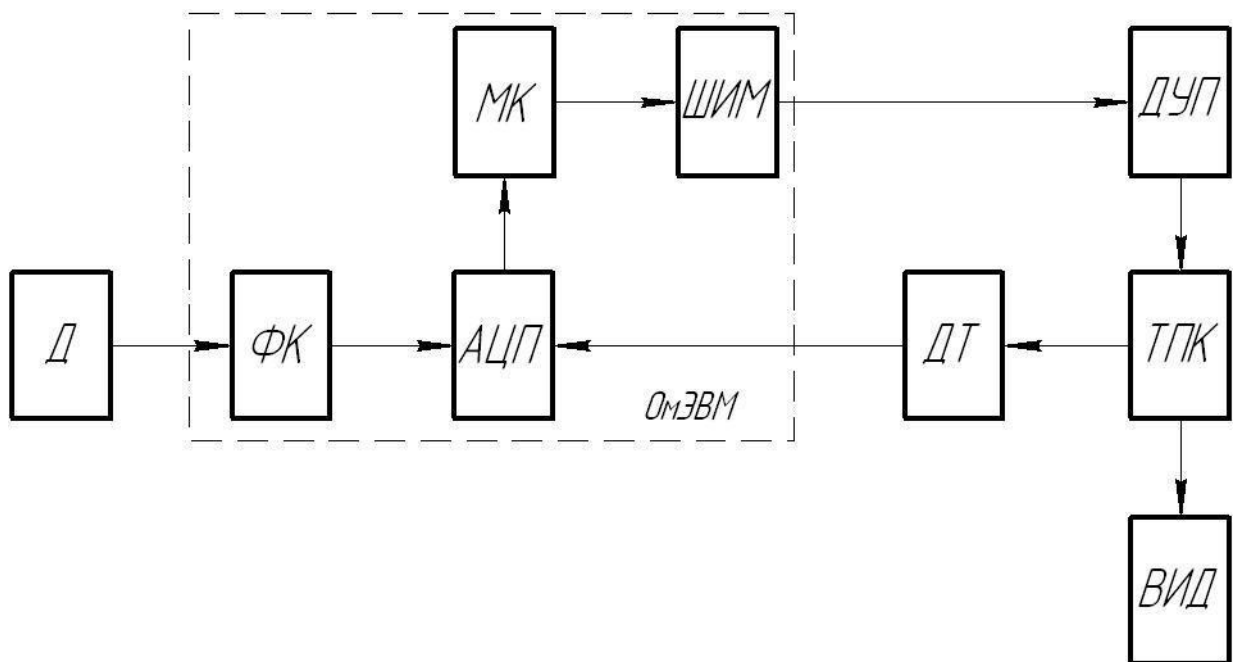


Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи керування вентильно-індукторним двигуном

За допомогою датчика температури відбувається зв'язок із зовнішнім середовищем. Інформацію про стан датчика сприймають АЦП і каскад, що формує, потім відбувається перетворення інформації в цифровий вигляд, і вона передається мікроконтролеру, той, у свою чергу, оновлює її до інформації про необхідну швидкість обертання ротора. У ролі коректора сигналів, що підводяться до блоку широтно-імпульсної модуляції, також виступає мікроконтролер. Відбувається формування імпульсних послідовностей (грунтуються на даних з мікроконтролера), далі вони будуть перетворені драйвером в сигнали управління транзисторним напівмостовим комутатором.

Всі напівмости мають датчики струму, які збирають інформацію, потім аналогово-цифровий перетворювач приводить її (аналоговий сигнал) до цифрового вигляду, це дозволяє обмежувати струм в обмотках, і, найголовніше, контролювати положення ротора.

Можливості сучасних механізмів та агрегатів автомобіля зростають на 8% на рік, водночас зростає та їх значущість.

На сьогоднішній день спостерігається наступна орієнтованість удосконалення бортової автомобільної електроніки:

- значними темпами йде заміна електричних вузлів на дискретних елементах (регулятори напруги, блоки управління охоронною сигналізацією, регулятори систем опалення, кондиціонування, підігріву двигуна, тахометри, спідометри тощо) електронними. Це дозволяє використовувати оптимальні алгоритми управління, часом така заміна сприяє підвищенню надійності керованого вузла;

- виробники впроваджують електронні пристрої для збирання інформації про стан усіх вузлів автомобіля. Все частіше подібні системи використовують мікро ЕОМ, що створює можливість аналізувати інформацію, що надходить, зберігати її і при необхідності відтворювати;

- постійна модернізація систем керування двигуном (СКД). Запалювання, подача палива, повітря – параметри, якими керує сучасна СКД. Спрямованість алгоритмів управління, в основному, орієнтована на отримання показників токсичності, що відповідають вимогам щодо екологічності транспортного засобу, що посилюються;

- все більшу роль електронні системи відіграють у системах активної безпеки та підтримання комфорту (гальмівна система, трансмісія та інші вузли автомашини).

Сучасне автомобільне обладнання варто розглядати як комплекс електронної апаратури та керованих виконавчих пристроїв, це відбувається внаслідок можливості впровадження мікроконтролерів практично будь-якого алгоритму управління.

Але електроніка, що знаходиться на борту автомашини, відрізняється від аналогів значною мірою, тому винні зовнішні умови, що впливають на транспортний засіб. Найважливішими факторами, які необхідно враховувати при розробці автомобільної електроніки, є ступінь перешкод, температурний режим навколо транспортного засобу, діапазон зміни напруги в бортовій мережі.

Сформулюємо вимоги до електрообладнання, а саме: встановлюються діапазони впливів довкілля на виробі електрообладнання залежно від місця встановлення на автомобілі (у моторному відділенні, в кабіні або із зовнішнього боку кузова), за яких функціонування виробів має відповідати. З урахуванням можливості встановлення електронної апаратури в моторному відділенні або в іншому місці ТЗ, спроектоване обладнання повинне зберігати працездатність у діапазоні температур від -55 до $+85$ °С.

У деяких випадках потрібно закладати можливість роботи електронних пристроїв у ширшому діапазоні зміни температури навколишнього середовища.

Відповідно до вищевказаних показників електронна апаратура, при номінальній напрузі бортової мережі, $U_{\text{ном}}=12$ В при зміні цього напруга в межах $5...15$, повинна бути повністю працездатною. У загальному випадку, для підвищення стабільності параметрів, апаратуру підключають до джерела стабілізованої напруги.

Потрібно враховувати, що роботі апаратури транспортного засобу заважають перешкоди. Основним джерелом перешкод по ланцюгах живлення та польових є індуктивні навантаження, що працюють у нестационарному режимі.

Характер і рівень перешкод може бути різним, тут відіграє роль величезна кількість факторів, у тому числі і від трасування джгутів проводів, розташування агрегатів електроустаткування, виконання комутуючих елементів, наявності електромагнітного екранування та ін. Для кожної моделі

автомобіля сукупність перерахованих факторів унікальна. Тому було загальноприйнято відштовхуватися від найнесприятливіших умов роботи.

У більшості випадків живлення всього електроустаткування здійснюється від паралельно з'єднаних генераторів та акумуляторної батареї (АКБ). У разі АКБ, крім іншого, виконує роль захисника електроніки від перешкод низької частоти.

Допустимими під час роботи електронної апаратури вважаються перешкоди з параметрами, наведеними в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Допустимі імпульсні перешкоди в нормальному режимі експлуатації

Номінальна напруга,	Рівень напруги (миттєві значення), В, не більше, при тривалості на цьому рівні				
	0,3 мкс	10 мкс	0,3 мс	10 мс	300 мс
14 (12)	(42/6)1	42/6	28/6	23/8	17,5/10,5
28 (24)	56/14	56/14	56/14	45/15,5	35/21

Конденсатори, діоди, транзистори, резистори – найголовніші елементи електроніки у транспорті. Перелік цих компонентів на сьогоднішній день досить великий, вони обов'язково відрізнятимуться один від одного цілою низкою параметрів. Що необхідно враховувати:

- важливо, щоб вироби випускалися серійно;
- стабільність характеристик у різних умовах (температура, вологість, тиск та інших.);
- вони повинні зберігати працездатність при впливі на них перешкод у ланцюгах живлення та зовнішнім електромагнітним полем, що наводяться;
- їх масогабаритні показники мають бути зменшені на стільки, наскільки можливо (зі збереженням тривалого терміну служби).

Виходячи з наведених факторів, віддаємо перевагу наступним виробникам: International recifier, Panasonic, Siemens Matsushita компонентів, ON Semiconductor (ON). Їхня продукція відповідає вимогам, описаним вище.

Застосовуємо резистори серій P1 та C2, полярні конденсатори Panasonic та керамічні конденсатори серій KM4, KM5, KM6. Електронні силові ключі MOSFET IRFU024N (International recifier). Інтегральні схеми управління напівмостами електронного комутатора IR2302 (International recifier). Інтегральний параметричний стабілізатор напруги KP142EH12A. Варистор S10K14AUTO (Siemens Matsushita компонентів). Мікросхема операційних підсилювачів для датчиків струму K1401УД2А. TVS-діод (transient voltage suppressor) марки 1N6210CA (ON) для захисту схеми. Діоди Шоттки для роботи в напівмостах MBR360 (ON). Мікроконтролер TMS320LC2402A. Цей електронний пристрій є спеціалізованим для керування вентиляно-індукторним двигуном. Напруга живлення мікросхеми становить $3,3 (\pm 0,3)$, споживаний струм при повному швидкодії (40 мільйонів операцій на секунду) дорівнює 85 мА. Перевагою даної однокристальної мікро ЕОМ полягає в наявності вбудованої пам'яті програм і даних, мікросхема випускається в шістдесяти чотирьох вивідному корпусі, має високу швидкодію, має розвинену периферію.

3.2 Розробка електричної принципової схеми

Основним елементом системи керування є мікроконтролер. У цьому дипломному проекті у ролі буде виступати мікросхема TMS320LC2402A (DD1). Вхідними сигналами для нього є:

- сигнал із датчика температури (контакт 3). Як датчик температури використовується напівпровідниковий терморезистор, який встановлений в систему охолодження двигуна (штатний датчик температури охолоджуючої рідини). Дільник напруги (резистори R2 R3) забезпечуватиме роботу датчика, послуживши посередником між ним та бортовою мережею. Використовуємо формувач-обмежувач, тому що потрібне узгодження між напругами на

аналогових входах OmEOM та датчика на вході. Конструктив також передбачає наявність конденсатора C2 та стабілітрону VD2, які розташовані на вході ланцюга підсилювача-обмежувача, їх функція - придушення імпульсних викидів напруги. Як формувач коду цифрового сигналу, у відповідність з аналоговим напругою (що, по суті, є функцією температури), використовується восьмиканальний десятирозрядний аналогово-цифровий перетворювач OmEOM. Для більш точного виміру сигналу потрібно налаштування балансу нуля, з цим завданням покликаний впоратися другий канал аналогово-цифрового перетворювача. На обидва канали (ADCIN03, ADCIN04) заведено виходи формувача-обмежувача, побудованого на основі підсилювача Нортонна;

- задіяно режим “програмна установка початку перетворення (S/W)” для сигналів з датчиків струму на входах: ADCIN00, ADCIN01 та ADCIN02.

Така установка задається за допомогою запису слова слова, що управляє, в регістр управління аналогово-цифрового перетворювача. Після ініціалізації МК, дані про поточну напругу ADCIN00 та ADCIN01 залишаються в регістрі результатів. Резистори R11, R18 і R25 є датчиками струму, споживаний схемою комутатора струм пропорційний падіння напруги на них. Для вимірювання високочастотного струму резистори повинні мати мінімальну індуктивність, і мати точність не менше 1.1%. Для цих цілей використовуємо R11, R18 і R25. Оскільки схема застосовується з діодами VD4, VD5 (і відповідно VD7, VD8 і VD10, VD11), внаслідок зворотного струму в діодах, вся накопичена йде назад в мережу (при повністю закритих транзисторах VT1, T5, VT. У цьому випадку операційний підсилювач (ОУ) DA1.2 (і відповідно DA1.3, DA1.4) слід підключати зі зміщенням робочої точки (між рівнем 3,3 і нулем) в цьому допоможуть R16, R17 (і відповідно R23, R24 і R30, R31). Відповідно до напруги на R11, R18 і R25 (при протіканні через них струмів, які споживають комутатори відповідних фаз), і максимально допустимому напрузі перетворення АЦП (резистори R14, R15 і, відповідно, R21, R22 і R28,

R29) був обраний коефіцієнт посилення ОУ. Точність щонайменше 1.1% - обов'язкова умова для резисторів, які входять до складу схеми обв'язок ОУ.

Для відключення обмоток двигуна, як порогові значення струму будуть використовуватися канали ADCIN00, ADCIN01, ADCIN02 OmEOM, так само канали ADCIN03 і ADCIN04 призначені для повного діапазону зміни напруги датчика температури.

Формовані імпульсні послідовності на PWM1/IOPA5, PWM2/IOPA6, PWM3/IOPA7 - це наслідок обробки вхідних сигналів. Ми можемо вільно змінювати частоту на виходах у кожному періоді, тому що МК TMS320LC2402A на своєму борту має модуль ШІМ. Свої власні, вбудовані резистори, які стиковані з шиною живлення (internal pullup), мають вихід. Завдяки резисторам R7, R8, R9, присутній нульовий рівень, а також, разом із вбудованими резисторами отримуємо дільник напруги. Не парне включення виходів ШІМ використовуватиметься для контролю комутатора, мікросхемою драйвера DD2 (DD3, DD4) - IR2302 здійснюватиметься поділ сигналів. Завдання драйвера – гальванічна розв'язка мікроконтролера та комутатора, а також драйвер автоматично встановлює "мертвий час" (20 нс). Величини ємностей C12, C15, C17 і C13, C16, C18 вважаються значеннями струму затвора, частоти проходження імпульсів на силові ключі, а також значення заряду затвора. Діод VD3, (VD6 і VD9) з резисторами R12, R13 (R19, R20 та R26, R27) є типовою обв'язкою мікросхеми IR2302.

BQ1 – кварцовий резонатор (фільтруючі ємності C9 та C11 та кільцевий фільтр на елементах C8, C10, R11 для мінімізації флуктуації частоти), його завданням є формування імпульсів тактової частоти МК. Місткість C7 відповідає за скидання МС, причому його заряд (при включенні живлення) повинен тривати не менше 125 періодів тактової частоти, оскільки це час ініціалізації МК. Сторожовий таймер (watchdog) подає сигнал, яким і відбувається скидання (є можливість скидання за заданими умовами).

Є рекомендація підключення входу TRST до землі через R6 опором 2,2 кОм (оскільки йому потрібні додаткові елементи обв'язки), це потрібні в

ситуаціях, коли МК використовується в середовищі з високорівневими перешкодами.

Вільні входи аналогово-цифрового перетворювача рекомендується з'єднати із землею.

За допомогою напруги підвищеної стабільності 3,3 В та рівнів 12 В, 3,3 В сформуємо харчування системи. Бортова мережа автомобіля - джерело живлення вентиляно-індукторного приводу, але в ній здійснені перешкоди та кидки напруги живлення. Для захисту схеми від перенапруги в бортовій мережі автомобіля слугує TVS-діод (transient voltage suppressor) VD1 марки 1N6210CA від фірми ON Semiconductor. Автомобільний варистор R1 захистить від кидків живлення. В якості фільтрів, що згладжують на вході -C1 і C3, на виході - C4 і C5, C6. Місткості C1, а також C4 та C6 –електролітичні, це зроблено з метою придушити тривалі перешкоди. Керамічні ємності C3 та C5 покликані придушити високовольтні викиди. За допомогою R4 робимо окремий ланцюг живлення (необхідний для живлення операційного підсилювача та аналогово-цифрового перетворювача, так само він дає граничний рівень перетворення). Резистор R5 є аналоговою та цифровою землею. Кожен елемент схеми (за винятком попадає тільки силовий комутатор) підключений до цифрової землі, таким чином виключаються перешкоди по ланцюгах живлення, створювані роботою комутатора.

Силовий комутатор ґрунтується на MOSFET транзисторах VT1, VT2 (VT3, VT4 та VT5, VT6) та діодах Шоттках VD4, VD5 (і відповідно VD7, VD8 та VD10, VD11). Навантаження як обмоток індукторної машини підключається до початку VT1 і стоку VT2. Оскільки під час роботи індукторної машини підведена енергія витрачається створення магнітного поля, і частина енергії перетворюється на механічну енергію (з урахуванням висновків, зроблених у розділі 1 цієї глави), частина енергії, запасену в магнітному полі необхідно віддавати у мережу. Ця схема дозволяє використовувати запасену в індуктивності обмоток енергію. Цим цілям служить демпфіруюча ємність C14.

3.3 Електромагнітний розрахунок вентильно-індукторного двигуна

Структура розрахунку індукторної машини відрізняється від відомих розрахункових схем асинхронних і колекторних машин, причиною тому змінна індуктивність фази, яка змінюється циклічно і залежить від насичення магнітопроводу. Важливо, що на сьогоднішній день вентильно-індукторний привід має мікропроцесорне управління, внаслідок чого не може бути високих пускових струмів, ми можемо не прив'язуватися до частот мережі.

У цьому розрахунку було прийнято такі припущення:

- а) взаємний вплив фаз не враховується;
- б) комутація вважається миттєвою, включення фази відбувається на момент її повного неузгодженості;
- в) насичення сталі відсутнє;
- г) приймається приблизна (максимально наближена) шматково-лінійна апроксимація кривої магнітної провідності повітряного зазору;
- д) втрати у сердечниках магнітопроводу враховуються приблизно.

Вихідними даними для розрахунку є:

- кількість фаз ($m=3$);
- напруга живлення $U = 14$ В.
- потужність двигуна на валу $P_{ном} = 130$ Вт;
- діаметр статора зовнішній, $D_a = 55$ мм;
- частота обертання в номінальному режимі $n = 3000$ об/хв;
- кількість пар полюсів першої гармоніки ($p_1=1$).

Шукаємо число зубців статора

$$Z_1 = 2 \cdot p_1 \cdot m \cdot q_1 \quad (3.1)$$

де $q_1 = 1$ — число пазів на полюс і фази;

$$Z_s = 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 = 6$$

Визначаємо чисельне значення зубців ротора

$$Z_R = \left(\frac{Z_S}{p_1} - 2 \right) \cdot p_1 = \left(\frac{6}{1} - 2 \right) \cdot 1 = 4 \quad (3.2)$$

Необхідно правильно підібрати число полюсів і фаз, оскільки крім порушення таких важливих показників, як рентабельність та енергоефективність, може сильно ускладнитися сам конструктив вентиляно-індукторної машини.

Основні залежності: збільшення кількості фаз збільшує число модулів комутатора (як показує практика, це економічно не вигідно), зате зменшується пульсація крутного моменту. Коли ми збільшуємо число полюсів, ми збільшуємо частоту фазного струму і перемагнічування, але водночас це дає приріст віброакустичних параметрів.

Частота фазного струму

$$f_c = \frac{n}{60} \cdot Z_R = \frac{3000}{60} \cdot 4 = 200 \text{ Гц} \quad (3.3)$$

Далі обчислюємо частоту обертання

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_c}{p_1} = \frac{60 \cdot 200}{1} = 1200 \text{ об/хв} \quad (3.4)$$

Знаходимо частоту перемагнічування ротора (при $Z_S > Z_R$)

$$f_R = \frac{n + n_1}{60} \cdot p_1 = \frac{3000 + 1200}{60} = 250 \text{ Гц.} \quad (3.5)$$

Після вибору конфігурації перейдемо до проектування зубцевої зони сердечників.

Після вибору конфігурації перейдемо до проектування зубцевої зони сердечників.

Проектування зубцевої зони статора

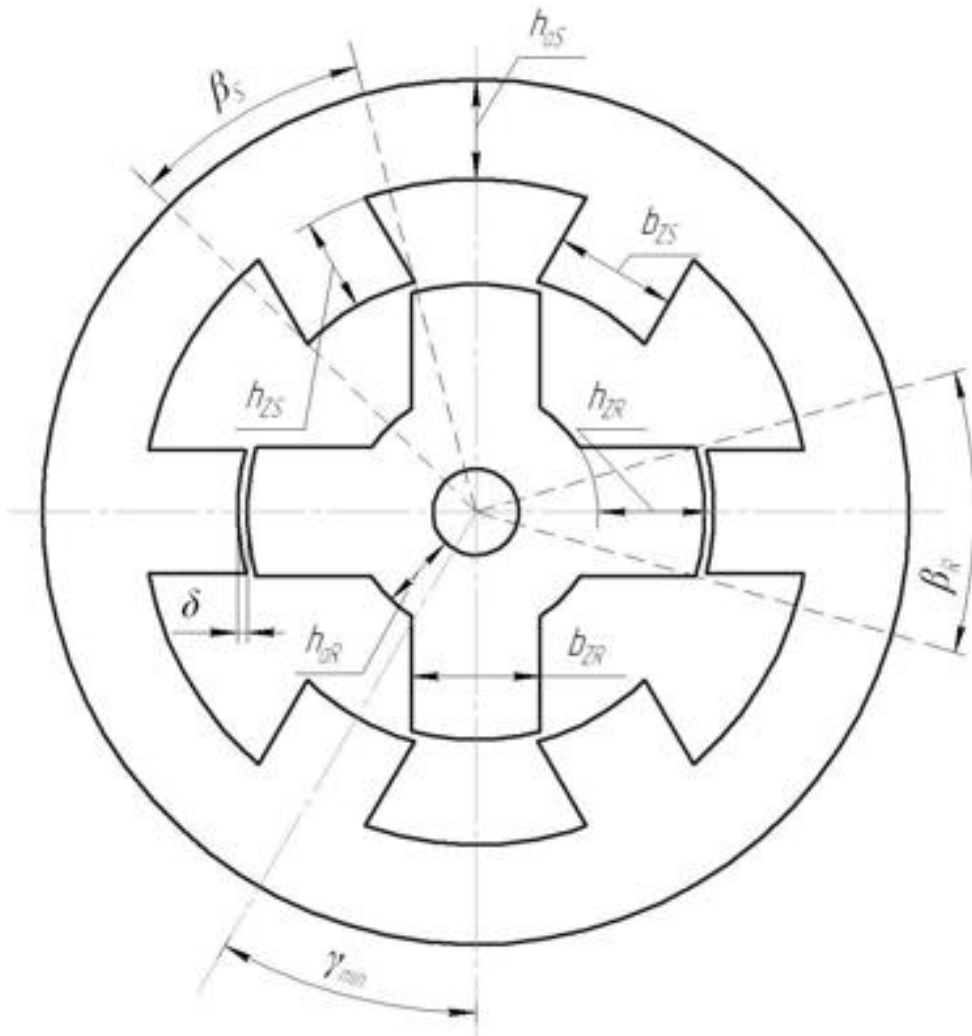


Рисунок 3.2 – Геометричні параметри магнітної системи ВІД

Спочатку за прийнятими значеннями Z_S та Z_R визначимо зубцеві поділки статора та ротора у кутових одиницях вимірювання. Зубцовий поділ статора дорівнюватиме

$$t_{Z_S} = \frac{2\pi}{Z_S} = \frac{6,28}{6} = 1,047 \text{ рад}, \quad (3.6)$$

або

$$t_{Z_S} = \frac{360}{Z_S} = \frac{360}{6} = 60^\circ \quad (3.7)$$

Зубцовий поділ ротора

$$t_{Z_R} = \frac{2\pi}{Z_R} = \frac{6,28}{4} = 1,571 \text{ рад} \quad (3.8)$$

або

$$t_{Z_R} = \frac{360}{Z_R} = \frac{360}{4} = 90^\circ \quad (3.9)$$

З наступних зразкових співвідношень визначимо кутові розміри, що відповідають ширині зубця ротора і статора на діаметрі розточування

$$\beta_S = 0,45 \cdot t_{zS} = 0,45 \cdot 1,047 = 0,471 \text{ рад}, \quad (3.10)$$

$$\beta_R = 0,5 \cdot t_{zS} = 0,5 \cdot 1,047 = 0,524 \text{ рад}, \quad (3.11)$$

або $\beta_S = 27^\circ$ та $\beta_R = 30^\circ$.

Далі визначимо діаметр розточування статора

$$D_i = \frac{D_a}{1 + 2 \cdot (k_{haS} + k_{hzS}) \cdot \sin \frac{\beta_S}{2}} \quad (3.12)$$

де $k_{haS} = (0,5...1)$ - відношення висоти ярма до ширини зубця статора (прийmemo $k_{haS} = 0,5$);

$k_{hzS} = (0,5...6)$ - відношення висоти зубця статора до його ширини (прийmemo $k_{hzS} = 2,5$);

$$D_i = \frac{55}{1 + 2 \cdot (0,5 + 2,5) \cdot \sin \frac{27^\circ}{2}} = 22,91 \text{ мм.}$$

Ширина зубця статора

$$b_{zS} = D_i \cdot \sin \left(\frac{\beta_S}{2} \right) = 22,91 \cdot \sin \left(\frac{27^\circ}{2} \right) = 5,348 \text{ мм} \quad (3.13)$$

Тоді висота ярма статора та його зубця відповідно рівні

$$h_{aS} = k_{haS} \cdot b_{zS} = 0,5 \cdot 5,348 = 2,674 \text{ мм}, \quad (3.14)$$

$$h_{zS} = k_{hzS} \cdot b_{zS} = 2,5 \cdot 5,348 = 13,371 \text{ мм.} \quad (3.15)$$

Після розрахунку розмірів зубцевий зони статора перейдемо до проектування зубцевої зони ротора.

Проектування зубцевої зони ротора

Виберемо величину повітряного зазору. Виходячи з рекомендацій, зазор для машин малої та середньої потужності лежить у межах від 0,3 до 0,5 мм (вибираємо $\delta = 0,3$ мм). Знаходимо зовнішній діаметр ротора

$$D_R = D_i - 2 \delta = 22,91 - 2 \cdot 0,3 = 22,31 \text{ мм} \quad (3.16)$$

Зубцевий розподіл ротора (у міліметрах)

$$t_{ZR} = \frac{\pi D_R}{Z_R} = \frac{3,14 \cdot 22,31}{4} = 17,522 \text{ мм} \quad (3.17)$$

Ширина зубця ротора

$$b_{ZR} = D_R \cdot \sin\left(\frac{\beta_R}{2}\right) = 22,31 \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) = 5,774 \text{ мм} \quad (3.18)$$

Співвідношення, що характеризують висоту ярма ротора та висоту зубців

$$h_{ZR} = (20 \dots 30) \cdot \delta = (20 \dots 30) \cdot 0,3 = (6 \dots 9) \text{ мм},$$

$$h_{aR} = (0,5 \dots 1,5) \cdot b_{ZR} = (0,5 \dots 1,5) \cdot 5,774 = (2,887 \dots 8,661) \text{ мм}.$$

Приймаємо $h_{ZR} = 6$ мм; $h_{aR} = 3$ мм.

Гранична ширина паза ротора

$$b_{PR_max} = D_R \cdot \sin\left(\frac{t_{ZR} - \beta_R}{2}\right) = 22,31 \cdot \sin\left(\frac{90^\circ - 30^\circ}{2}\right) = 11,155 \text{ мм}. \quad (3.19)$$

Найменша ширина паза статора

$$b_{PS_min} = D_i \cdot \sin\left(\frac{t_{ZS} - \beta_S}{2}\right) = 22,91 \cdot \sin\left(\frac{60^\circ - 27^\circ}{2}\right) = 6,507 \text{ мм}. \quad (3.20)$$

Потрібно, щоб виконувалися такі умови (це потрібно, щоб ККД мав високе значення): $b_{PR_max} > b_{ZS}$; $b_{PS_min} > b_{ZR}$. У нашому випадку: $11,155 > 5,348$ та $6,507 > 5,774$. Умови виконуються.

Знайдемо внутрішній діаметр ротора, виходячи з отриманих значень:

$$D_{Ri} = D_R - 2 \cdot h_{ZR} - 2 \cdot h_{aR},$$

$$D_{Ri} = 22,31 - 2 \cdot 6 - 2 \cdot 3 = 4,31 \text{ мм}. \quad (3.21)$$

У подальших розрахунках нам знадобляться ще деякі геометричні параметри, які є сенс розрахувати тут же.

Площа перерізу паза статора

$$S_{PS} = \frac{\pi(D_i + h_{ZS}) \cdot h_{ZS}}{Z_S} - b_{ZS} \cdot h_{ZS},$$

$$S_{PS} = \frac{3,14(22,91 + 13,371) \cdot 13,371}{6} - 5,348 \cdot 13,371 = 182,489 \text{ мм}^2. \quad (3.22)$$

Максимальна площа котушки

$$S_{K-max} = \frac{S_{PS}}{2},$$

$$S_{K-max} = \frac{182,849}{2} = 91,244 \text{ мм}^2. \quad (3.23)$$

Інтервали циклу комутації

Обчислимо кутову швидкість ротора

$$\omega_R = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314,159 \text{ рад/с} \quad (3.24)$$

Максимальний інтервал наростання струму при мінімальній провідності

$$\gamma_{\text{вмик_max}} = 0,5 \cdot (t_{ZR} - \beta_S - \beta_R), \quad (3.25)$$

$$\gamma_{\text{вмик_max}} = 0,5 \cdot (1,571 - 0,471 - 0,524) = 0,288 \text{ рад.}$$

Тоді час наростання струму при мінімальній провідності буде рівний:

$$t_{\text{вмик_max}} = \frac{\gamma_{\text{вмик_max}}}{\omega_R} \cdot 10^3, \quad (3.26)$$

$$t_{\text{вмик_max}} = \frac{0,288}{314,159} \cdot 10^3 = 0,917 \text{ мс.}$$

Мінімальний кут, на який необхідно повернути ротор до узгодженого положення якої-небудь фази, якщо в даний момент повністю узгоджена сусідня з нею фаза, дорівнює

$$\gamma_{\min} = t_{ZR} - t_{ZS} = 1,571 - 1,047 = 0,524 \text{ рад.} \quad (3.27)$$

Тоді час роботи фази буде рівний

$$t_{\text{роб}} = \frac{\gamma_{\text{роб}}}{\omega_R} \cdot 10^3, \quad (3.28)$$

$$t_{\text{роб}} = \frac{0,524}{314,159} \cdot 10^3 = 1,667 \text{ мс.}$$

Кут перекриття зубців при повороті ротора з повністю неузгодженого положення на кут $\gamma_{\text{роб}}$

$$\beta_{SRm} = \gamma_{роб} - \gamma_{вмик_max}, \quad (3.29)$$

$$\beta_{SRm} = 0,524 - 0,288 = 0,236 \text{ рад.}$$

при цьому ширина перекриття зубців статора і ротора

$$b_{SRm} = 0,5 \cdot \beta_{SRm} \cdot (D_i - \delta), \quad (3.30)$$

$$b_{SRm} = 0,5 \cdot 0,236 \cdot (22,91 - 0,3) = 2,664.$$

Визначення деяких параметрів обмотки і струмів ВІД (вентильно-індукторного двигуна)

Кількість елементарних провідників в ефективному $a_{ел} = 1$, паралельних гілок $a = 1$.

Число котушок у фазі

$$n_k = \frac{Z_S}{m} = \frac{6}{3} = 2. \quad (3.31)$$

Число послідовно з'єднаних котушок у гілці

$$n_{кв} = \frac{n_k}{a} = \frac{2}{1} = 2. \quad (3.32)$$

Діюче значення струму на вході інвертора

$$I_d = \frac{P_{ном}}{\eta \cdot (U - 2U_B)} \quad (3.33)$$

де η — орієнтовне значення КПД ВІД (приймаємо $\eta = 0,77$);

U_B — падіння напруги на вентилі інвертора (приймаємо $U_B = 0,4 \text{ В}$);

$$I_d = \frac{130}{0,78(14 - 2 \cdot 0,4)} = 12,79 \text{ А.}$$

Формули для зв'язку I_d та I_{Km} будуть різними в залежності від форми струму та комутації.

Форма струму — прямокутна, комутація — поодинок

$$I_{Km} = \frac{I_d}{a} = \frac{12,745}{1} = 12,79 \text{ А.} \quad (3.34)$$

Діюче значення струму котушки (попередньо)

$$I'_K = \frac{I_{Km}}{\sqrt{m}} = \frac{12,745}{\sqrt{3}} = 7,384 \text{ А.} \quad (3.35)$$

Форма струму — трикутна, комутація — поодинок

$$I_{Km} = I'_K \cdot 2,4 \cdot \sqrt{m} = 7,358 \cdot 2,4 \cdot \sqrt{3} = 30,697 \text{ А.} \quad (3.36)$$

Формули (3.38) і (3.40) визначають два крайніх випадки — найменше і найбільші можливі значення амплітуди струму. Реальне значення струму I_{Km} має лежати у цьому діапазоні.

Струми у фазах

Напруга на індуктивності фази обмотки

$$U_{dL} = U - \Delta U'_R, \quad (3.37)$$

де $\Delta U'_R$ — падіння напруги на активному опорі обмотки (на початку розрахунку приймається рівним нулю і уточнюється після визначення активного опору обмотки);

$$U_{dL} = 14 - 0 = 14 \text{ В.}$$

Вибираємо довжину осердь l_δ і число витків у котушці W_k ВІД. Це ітераційний процес: необхідно провести кілька послідовних розрахунків для того, щоб знайти оптимальне поєднання значень l_δ та W_k . У цій роботі для економії часу наведено тільки кінцевий варіант розрахунку з оптимально підібраними l_δ та W_k , виходячи із забезпечення необхідної потужності та прийняттого коефіцієнта заповнення міддю $k_{3M} = (0,35 \dots 0,45)$.

Приймаємо $l_\delta = 31$ мм та $W_k = 46$.

Тоді максимальне значення струму в котушці

$$I_{Km} = \frac{U_{dL} \cdot t_{\text{ВМИК_max}}}{n_{\text{КВ}} \cdot \mu_0 \cdot l_\delta \cdot W_k^2 \cdot \lambda_{\text{min}}} \quad (3.38)$$

$$I_{Km} = \frac{U_{dL} \cdot t_{\text{ВМИК_max}}}{2 \cdot 12,57 \cdot 10^{-7} \cdot 31 \cdot 46^2 \cdot 3,344} = 23,269 \text{ А.}$$

У вентильно-індукторному двигуні найбільше значення потоку може бути тільки в момент відключення фази

$$\Phi_{\text{max}} = \frac{U_{dL} \cdot t_{\text{роб}}}{n_{\text{КВ}} \cdot W_k} = \frac{14 \cdot 1,667}{2 \cdot 46} = 0,254 \text{ мВб,} \quad (3.39)$$

тому амплітудне значення індукції в зубці статора

$$B_{ZS} = \frac{\Phi_{\text{max}} \cdot 10^3}{b_{ZS} \cdot l_\delta \cdot 0,95}, \quad (3.40)$$

$$B_{ZS} = \frac{0,254 \cdot 10^3}{5,348 \cdot 31 \cdot 0,95} = 1,61 \text{ Тл.}$$

Величина B_{ZS} повинна лежати в межах від 1,6 до 1,7 Тл.

Струм у котушці при перекритті зубців у момент $t_{роб}$ при її відключенні

$$I_{K_відкл} = \frac{\Phi_{max}}{\mu_0 \cdot l_\delta \cdot W_K \cdot \lambda_{SRm}}, \quad (3.41)$$

$$I_{K_відкл} = \frac{0,254}{12,57 \cdot 10^{-7} \cdot 31 \cdot 46 \cdot 12,727} = 11,117 \text{ А.}$$

Залежність струму необхідно представити як апроксимацію на кількох ділянках комутації (тільки так можна дізнатися діюче значення котушкового струму).

Інтервал з початку ввімкнення ($\gamma = 0$) до початку перекриття зубців ($\gamma_1 = \gamma_{вмик_max}$), струм, лінійно збільшуючись, приймає значення I_{K_m} . Далі струм, поряд зі зміною потокозчеплення та індуктивності, змінюється від I_{K_m} до $I_{K_відкл}$ (інтервал від γ_1 до $\gamma_{раб} = \gamma_{min}$). Індуктивність фази на цій ділянці

$$L(\theta) = L_1 + L_2 \theta, \quad (3.42)$$

де

$$L_1 = L_{K_min} \cdot \left(1 - \frac{K\lambda - 1}{\beta_S} \cdot \gamma_{вмик_max} \right); \quad (3.43)$$

$$L_2 = L_{K_min} \cdot \frac{K\lambda - 1}{\beta_S}. \quad (3.44)$$

Визначимо мінімальну індукцію

$$L_{K_min} = \mu_0 \cdot l_\delta \cdot W_K^2 \cdot \lambda_{min} \cdot 10^{-3}, \quad (3.45)$$

$$L_{K_min} = 12,57 \cdot 10^{-7} \cdot 31 \cdot 10^{-7} \cdot 3,344 \cdot 10^{-3} = 2,758 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

тут $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$ — магнітна проникність повітря;

тоді

$$L_1 = 2,758 \cdot 10^{-4} \cdot \left(1 - \frac{6,124 - 1}{0,471} \cdot 0,288 \right) = -5,877 \cdot 10^{-4} \text{ Гн,}$$

$$L_2 = 2,758 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{6,124 - 1}{0,471} = 2,998 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/рад,}$$

$$L(\theta) = -5,877 \cdot 10^{-4} + 2,998 \cdot 10^{-3} \cdot \theta \text{ Гн.}$$

Зменшення струму від $I_{K_відкл}$ до нуля (інтервал негативної напруги). Співвідношення Ψ та L , а також частота обертання впливають на його зміни. Прийmemo, що у даному інтервалі струм зменшується лінійно.

Визначимо квадрат діючого значення струму котушки (з огляду на апроксимацію)

$$I_K^2 = \frac{1}{m \cdot \gamma_{min}} \left[\int_0^{\gamma_1} \left(\frac{I_{Km} \cdot \theta}{\gamma_1} \right)^2 d\theta + \int_{\gamma_1}^{\gamma_{роб}} \left(\frac{U_{dL} \cdot \theta}{\omega_R \cdot n_{кв} \cdot (L_1 + L_2 \theta)} \right)^2 d\theta + \right. \\ \left. + \int_0^{\gamma_{роб}} \left(I_{K_відкл} - \frac{I_{K_відкл}}{\gamma_{роб}} \cdot \theta \right)^2 d\theta \right] = \frac{1}{3 \cdot 0,524} \cdot \left[\int_0^{0,288} \left(\frac{12,79 \cdot \theta}{0,288} \right)^2 d\theta + \right. \\ \left. + \int_{0,288}^{0,524} \left(\frac{14 \cdot \theta}{0,3141592 \cdot (-5,877 + 2,998 \cdot \theta)} \right)^2 d\theta + \int_0^{0,524} \left(11,117 - \frac{11,117}{0,524} \theta \right)^2 d\theta \right] = 23,97 \text{ A}^2. \quad (3.46)$$

Після вилучення квадратного кореня остаточно визначаємо діюче значення струму в котушці

$$I_K = 4,896 \text{ A} \quad (3.47)$$

Значення номінального струму в фазі

$$I_\phi = I_K \cdot a = 4,889 \cdot 1 = 4,896 \quad (3.48)$$

Момент і потужність ВІД

Апроксимація кривої допоможе визначити обертальний момент.

Нульове значення моменту (від $\gamma=0$ до $\gamma_1=\gamma_{вмик_max}$) при постійно індуктивності. На ділянці від γ_1 до $\gamma_{роб}$ відбувається зменшення моменту

$$M_{відкл} = p_1 L_2 I_{K_відкл}^2 \quad (3.49)$$

починаючи з максимального значення

$$M_{відкл} = p_1 L_2 I_{Km}^2 \quad (3.50)$$

На інтервалі

$$\gamma_2 = \gamma_{вмик_max} + \beta_S - \gamma_{роб} = 0,288 + 0,471 - 0,524 = 0,236 \text{ рад.}$$

момент зменшується до значення

$$M_{Hmax} = p_1 L_2 \left(I_{K_відкл} - \frac{I_{K_відкл}}{\gamma_{роб}} \cdot \gamma_2 \right)^2, \quad (3.51)$$

на інтервалі постійної максимальної індуктивності він знову приймає нульове значення. Нарешті, на інтервалі спадної індуктивності момент приймає від'ємне значення, набуваючи гальмівного характеру

$$M_{Tmax} = p_1 L_2 \left(I_{K_відкл} - \frac{I_{K_відкл}}{\gamma_{роб}} \cdot \gamma_3 \right)^2, \quad (3.52)$$

З урахуванням цього запишемо вираз для визначення квадрата середнього моменту ВІД

$$M_{cp}^2 = \frac{p_1 \cdot L_2}{\gamma_{min}} \left[\int_{\gamma_1}^{\gamma_{роб}} \left(\frac{U_{dL} \cdot \theta}{\omega_R \cdot n_{KB} \cdot (L_1 + L_2 \theta)} \right)^2 d\theta + \int_0^{\gamma_2} \left(I_{K_відкл} - \frac{I_{K_відкл}}{\gamma_{роб}} \cdot \theta \right)^2 d\theta + \int_{\gamma_3}^{\gamma_{роб}} \left(I_{K_відкл} - \frac{I_{K_відкл}}{\gamma_{роб}} \cdot \theta \right)^2 d\theta \right], \quad (3.53)$$

де $\gamma_3 = \gamma_2 + \beta_R - \beta_S = 0,236 + 0,524 - 0,471 = 0,288$ рад,

$$M_{cp}^2 = \frac{1 \cdot 2,998 \cdot 10^{-3}}{0,524} \left[\int_{0,288}^{0,524} \left(\frac{14 \cdot \theta}{0,314159 \cdot 2 \cdot (-5,877 + 2,998\theta)} \right)^2 d\theta + \int_0^{0,236} \left(11,117 - \frac{11,117}{0,524} \cdot \theta \right)^2 d\theta + \int_{0,288}^{0,524} \left(11,117 - \frac{11,117}{0,524} \cdot \theta \right)^2 d\theta \right] = 0,175 \text{ (Нм)}^2.$$

Тоді середній момент ВІД дорівнюватиме

$$M_{cp} = 0,419 \text{ Нм}. \quad (3.54)$$

Номінальний момент

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_R} = \frac{130}{314,159} = 0,414 \text{ Нм} \quad (3.55)$$

Потужність ВІД

$$P = \omega_R \cdot M_{cp} = 314,159 \cdot 0,419 = 131,547 \text{ Вт}. \quad (3.56)$$

Коефіцієнт заповнення паза

Згідно з рекомендаціями, густина струму в обмотках ВІД (вентильно-індукторного двигуна) повинна лежати в межах від 3 до 9 А/мм².

Для нашого випадку приймемо густина струму $j_K = 6$ А/мм².

Визначаємо переріз міді котушки

$$S_{\text{МК}} = \frac{I_K W_K}{j_K} = \frac{4,896 \cdot 46}{6} = 37,535 \text{ мм}^2. \quad (3.57)$$

Переріз дроту

$$S_{\text{пр}} = \frac{S_{\text{МК}}}{W_K \cdot a_{\text{ел}}} = \frac{37,535}{46 \cdot 1} = 0,816 \text{ мм}^2. \quad (3.58)$$

Коефіцієнт заповнення паза міддю (повинен знаходитися в діапазоні 0,35-0,45)

$$k_{\text{зм}} = \frac{S_{\text{МК}}}{S_{K_{\text{max}}}} = \frac{37,48}{91,244} = 0,411. \quad (3.59)$$

Урахування активного опору фази

Середня довжина лобової частини котушки дорівнює

$$L_{\text{л_сер}} = \frac{\pi}{2} \cdot \left[\frac{\pi(D_i + h_{\text{ZS}})}{Z_S} - \frac{S_{K_{\text{max}}}}{h_{\text{ZS}}} \right], \quad (3.60)$$

$$L_{\text{л_сер}} = \frac{3,14}{2} \cdot \left[\frac{3,14 \cdot (22,91 + 13,371)}{6} - \frac{91,244}{13,371} \right] = 19,12 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка котушки

$$L_{\text{вит_сер}} = 2 \cdot (l_{\delta} + L_{\text{л_сер}}), \quad (3.61)$$

$$L_{\text{вит_сер}} = 2 \cdot (31 + 19,12) = 100,241 \text{ мм.}$$

Активний опір котушки при $t_{\text{обм}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$

$$R_{K20} = \frac{L_{\text{вит_сер}} \cdot W_K^2 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot S_{K_{\text{max}}} \cdot k_{\text{зм}}}, \quad (3.62)$$

$$R_{K20} = \frac{100,241 \cdot 46^2 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 91,244 \cdot 0,411} = 0,099 \text{ Ом.}$$

Активний опір котушки при температурі обмотки $t_{\text{обм}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$

$$R_K = R_{K20} \cdot [1 + 0,0039 \cdot (t_{\text{обм}} - 20)], \quad (3.63)$$

$$R_K = 0,099 \cdot [1 + 0,0039 \cdot (75 - 20)] = 0,12 \text{ Ом.}$$

Падіння напруги на активному опорі фази

$$\Delta U_R = n_{\text{кв}} \cdot R_K \cdot I_K = 2 \cdot 0,121 \cdot 4,889 = 1,179 \text{ В.} \quad (3.64)$$

Зменшимо початкову напругу на 1,179 В, обчислимо падіння напруги активного опору фази. Маючи нове значення напруги, виконаємо перерахунок вентильно-індукторного двигуна. Після кількох ітерацій отримуємо

оптимальний варіант, що задовольняє задані вимоги. Отримані значення зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Кінцеві параметри проектного двигуна

l_δ , мм	W_K	k_{haS}	k_{hZS}	I_{Km} , А	B_{ZS} , Тл	P , Вт	$k_{зм}$	S_{np} , мм ²	I_K , А	M_{cp} , Н·м
30	43	0,5	2,5	25,199	1,63	130,46	0,4	0,855	5,129	0,415

Відбираємо мідний круглий провід ПЕТВ діаметром 1,04 мм і площею поперечного перерізу 0,849 мм².

Напруга живлення (уточнена)

$$U_d = U_{dL} + \Delta U_R = 12,821 + 1,086 = 13,908 \text{ В} \quad (3.65)$$

Розрахунок втрат і ККД

Розділимо всі втрати, що мають місце у ВІД, на електричні, магнітні та механічні.

Нехтуючи втратами у з'єднувальних дротах, електричні втрати в обмотках ВІД

$$P_{ел} = I_K^2 \cdot R_K \cdot Z_S = 5,122^2 \cdot 0,106 \cdot 6 = 16,687 \text{ Вт} \quad (3.66)$$

Магнітні втрати становлять суму гістерезисних втрат (через перемагнічування сталі) та втрат на вихрові струми. Визначення магнітних втрат у ВІД супроводжується великими складнощами через несинусоїдальність зміни магнітної індукції. Разом із тим, для наближеної оцінки магнітних втрат у ВІД можна скористатися формулами, що застосовуються при розрахунку втрат у традиційних ЕМ, з уточненням коефіцієнтів, які входять до цих формул.

Визначаємо індукцію в сталевих ділянках магнітопроводу:

$$- \text{ в ярмі статора} \\ B_{aS} = B_{ZS} \cdot \frac{b_{ZS}}{2h_{aS}} = 1,63 \cdot \frac{5,348}{2 \cdot 2,674} = 1,63 \text{ Тл}, \quad (3.67)$$

- у зубцях ротора

$$B_{ZR} = B_{ZS} \cdot \frac{b_{ZS}}{b_{ZR}} = 1,63 \cdot \frac{5,348}{5,774} = 1,51 \text{ Тл}, \quad (3.68)$$

- в ярмі ротора:

$$B_{aR} = B_{ZS} \cdot \frac{b_{ZS}}{2h_{aR}} = 1,63 \cdot \frac{5,348}{2 \cdot 3} = 1,453 \text{ Тл}. \quad (3.69)$$

Втрати в сталі статора

$$P_{CS} = \frac{p_{yD}}{B_u^2} \cdot \left(\frac{f_c}{f_u} \right)^{1,3} \cdot k_{da} B_{aS}^2 m_{aS} + k_{dz} B_{ZS}^2 m_{ZS}, \quad (3.70)$$

де $k_{da} = 1,8$ и $k_{dz} = 2$ є коефіцієнтами, які враховують збільшені в сталі ярма та зубців ВІД втрати, що виникли через технологічні фактори;

$B_u = 1,5$ Тл – індукція для визначення втрат;

$f_u = 50$ Гц – частота для визначення втрат;

$$P_{CS} = \frac{1,05}{1,5^2} \cdot \left(\frac{200}{50} \right)^{1,3} \cdot (1,8 \cdot 1,63^2 \cdot 0,095 + 2 \cdot 1,63^2 \cdot 0,092) = 2,668 \text{ Вт}.$$

Втрати в сталі ротора

$$P_{CR} = \frac{p_{yD}}{B_u^2} \cdot \left(\frac{f_c}{f_u} \right)^{1,3} \cdot k_{da} B_{aR}^2 m_{aR} + k_{dz} B_{ZR}^2 m_{ZR}, \quad (3.71)$$

$$P_{CR} = \frac{1,05}{1,5^2} \cdot \left(\frac{200}{50} \right)^{1,3} \cdot (1,8 \cdot 1,453^2 \cdot 0,015 + 2 \cdot 1,51^2 \cdot 0,03) = 0,544 \text{ Вт}.$$

Втрати в сталі

$$P_c = P_{\{CS\}} + P_{\{CR\}} = 2,668 + 0,544 = 3,212 \text{ Вт} \quad (3.72)$$

Механічні втрати являють собою втрати на тертя в підшипниках, на тертя обертових частин об повітря, на подолання аеродинамічного опору в системі охолодження двигуна. У межах дипломного проектування механічні втрати $P_{\text{мех}}$ можна прийняти рівними нулю.

Сумарні втрати у ВІД

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{ел}} + P_c = 16,687 + 3,212 = 19,9 \text{ Вт}. \quad (3.73)$$

Коефіцієнт корисної дії ВІД

$$\eta = \frac{P}{P + P_{\text{сум}}} = \frac{130,46}{130,46 + 19,9} = 0,868. \quad (3.74)$$

Підсумковий струм на вході інвертора

$$I_d = \frac{P}{\eta(U_d - 2U_B)} = \frac{130,46}{0,868 \cdot (13,907 - 2 \cdot 1)} = 12,628 \text{ А} \quad (3.75)$$

Побудова характеристик

Залежності основних змінних на циклі комутації ВІД можна побудувати, використовуючи прийняті апроксимації для кривої магнітної провідності повітряного зазору, для кривої фазного струму при розрахунку його діючого значення та для кривої моменту.

Характерні значення для побудови характеристик:

$$\gamma_{\text{роб}} = 0,524 \text{ рад}; \gamma_1 = 0,288 \text{ рад};$$

$$\gamma_2 = 0,236 \text{ рад}; \gamma_3 = 0,288 \text{ рад};$$

$$\beta_S = 0,471 \text{ рад}; U = 13,908 \text{ В};$$

$$\Psi_{\text{max}} = W_K \setminus \Phi_{\text{max}} = 43 \cdot 0,248 = 10,684 \text{ мВб};$$

$$I_{Kt} = 25,199 \text{ А};$$

$$I_{K_вимк} = 12,04 \text{ А}.$$

$M_{\text{вимк}}, M_{\text{max}}, M_{H \text{ max}}, M_{T \text{ max}}$ розраховуємо за формулами (3.53) – (3.56):

$$M_{\text{вимк}} = 1 \cdot 2,535 \cdot 10^{-3} \cdot 12,04^2 = 0,368 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{max}} = 1 \cdot 2,535 \cdot 10^{-3} \cdot 25,199^2 = 1,61 \text{ Нм}$$

$$M_{H \text{ max}} = 1 \cdot 2,535 \cdot 10^{-3} \cdot \left(12,04 - \frac{12,04}{0,524} \cdot 0,236 \right)^2 = 0,111 \text{ Нм},$$

$$M_{T \text{ max}} = 1 \cdot 2,535 \cdot 10^{-3} \cdot \left(12,04 - \frac{12,04}{0,524} \cdot 0,288 \right)^2 = 0,074 \text{ Нм}.$$

Інтервал зменшеної індуктивності – від'ємний момент.

При побудові характеристик (рисунок 3.3) прийнято такі припущення:

на інтервалі часу увімкнення фази напруга є постійною і дорівнює U_d , після вимкнення фази напруга дорівнює $-U_d$ і діє на інтервалі, рівному часу роботи фази. Інвертування напруги потрібно для швидкого гасіння поля (розфорсування), що призводить до підвищення моменту та плавності обертання ротора;

- потягосцепление фази на інтервалі її включення зростає по лінійному

закону, а при $-U_d$ лінійно спадає до нуля;

- зміна провідності приймається за кусочно-лінійною залежності.

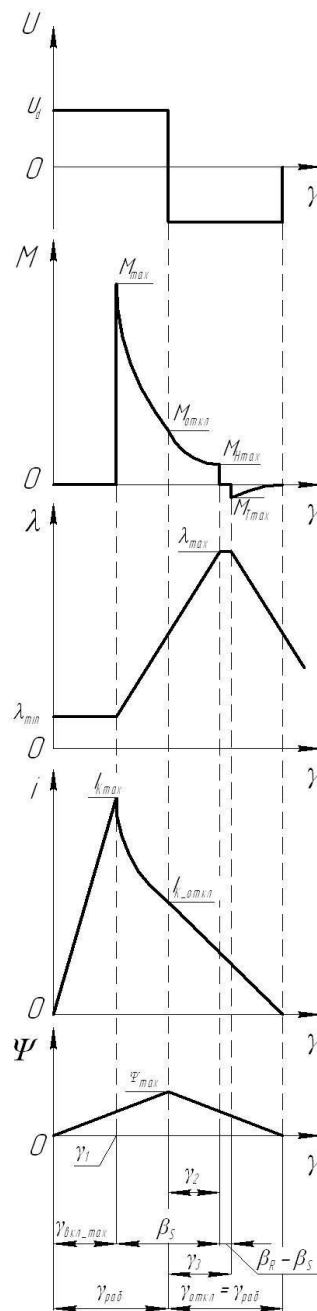


Рисунок 3.3 – Основні залежності спроектованого ВІД

Використовуємо комутацію фаз індукторної машини типу А-АВ-В-ВС-С-СА-А-... (рисунок 3.4). У такому разі одна і дві фази працюватимуть поперемінно (несиметрична комутація), внаслідок чого можна домогтися

зменшення пульсацій обертального моменту і, тим самим, зниження вібрації та шуму двигуна, що позитивно позначиться на його роботі та довговічності.

Якщо ж потрібно отримати реверсивний напрямок обертання двигуна, то алгоритм комутації фаз слід змінити на зворотний, тобто А-АС-С-СВ-В-ВА-А-... (рисунок 3.4). Таким чином, спроектований двигун є універсальним і може використовуватися для інших цілей.

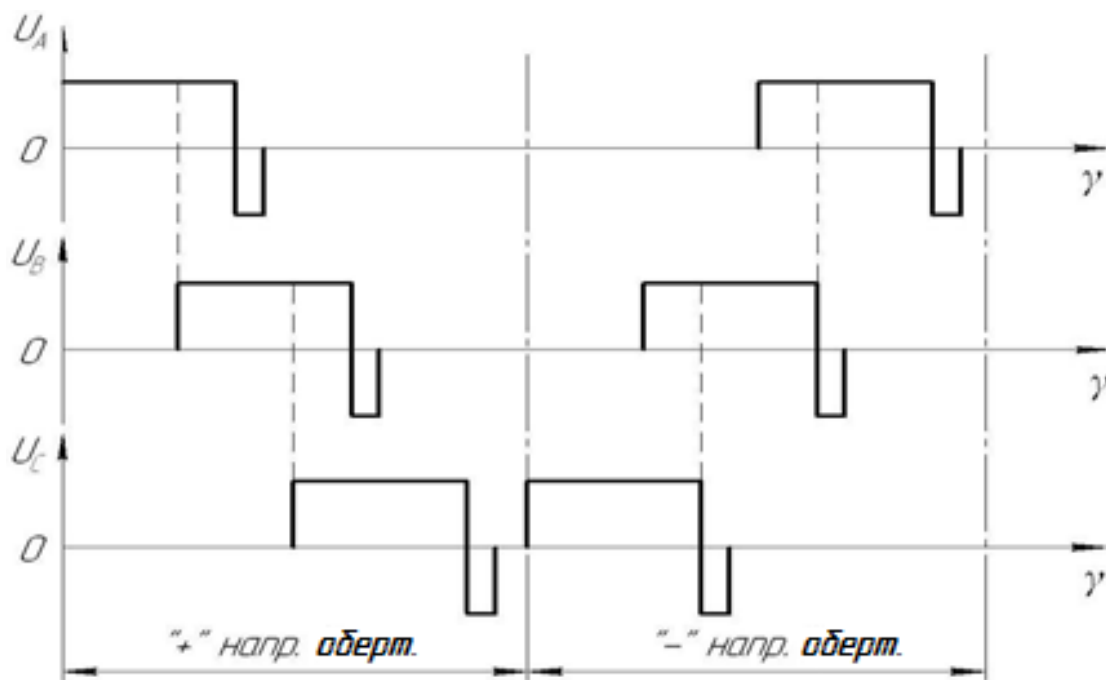


Рисунок 3.4 – Визначення несиметричної комутації фаз та реверсу

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці під час виконання робіт з експлуатації, технічного обслуговування та ремонту систем охолодження автомобілів є важливою складовою забезпечення безпеки персоналу авторемонтних майстерень та СТО. Цей розділ присвячений аналізу нормативно-правової бази, виявленню шкідливих і небезпечних виробничих факторів, розробці організаційних та технічних заходів, а також виконанню необхідних інженерних розрахунків для створення безпечних умов праці.

4.1 Аналіз нормативної бази з охорони праці при роботі з системами охолодження

В Україні діяльність, пов'язана з експлуатацією та ремонтом автомобільних систем охолодження, регулюється низкою законодавчих та нормативно-правових актів. Основним документом є Закон України «Про охорону праці», який встановлює обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці та відповідальність працівників за дотримання вимог безпеки. Безпосередньо до робіт з системами охолодження застосовні наступні нормативні документи:

– Правила охорони праці на автомобільному транспорті (НПАОП 63.2-1.01-10) – визначають вимоги безпеки під час технічного обслуговування та ремонту автомобілів, зокрема при роботі з рідинами, що охолоджують, під тиском, при використанні електроінструменту та підйомно-транспортного обладнання.

– ДСТУ EN 953:2005 «Безпечність машин. Огородження. Загальні вимоги до конструкції та виготовлення нерухомих та пересувних огорожень» – стосується захисту від обертових частин вентиляторів систем охолодження.

– ДСТУ 7239:2011 «Системи стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги» – регламентує захист персоналу від ураження електричним струмом при роботі з електроприводами вентиляторів, насосів, датчиків.

– ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні норми та правила роботи з візуальними дисплейними терміналами ЕОМ» – при використанні комп'ютерної діагностики.

– НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів» – для безпечного обслуговування електрообладнання систем охолодження.

Крім того, важливими є інструкції з охорони праці для слюсаря-ремонтника автомобілів, що розробляються на кожному підприємстві з урахуванням конкретних умов роботи. Для робіт з антифризами (етиленгліколь, пропіленгліколь) слід керуватися ГДК шкідливих речовин згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» та переліком речовин, що підлягають контролю в повітрі робочої зони.

4.2 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при роботі з системами охолодження

В процесі експлуатації та ремонту систем охолодження на персонал можуть впливати наступні небезпечні та шкідливі фактори (згруповані за природою походження):

Фізичні фактори:

Рухомі частини (вентилятори з гострими лопатями, паси, шківи) – ризик затягування, порізів, ударів.

Підвищена температура поверхонь (двигун, радіатор, патрубки) до 90-110 °С – ризик термічних опіків.

Підвищений тиск у системі охолодження (до 1,5 бар) – небезпека викиду гарячої рідини при відкритті кришки радіатора.

Електричний струм (електроприводи вентиляторів – напруга 12/24 В постійного струму, діагностичні прилади – 220 В) – ризик ураження, короткого замикання.

Недостатнє або надмірне освітлення робочої зони.

Підвищений рівень шуму та вібрації (особливо при роботі несправних вентиляторів або пневмоінструменту).

Хімічні фактори:

Токсичність охолоджуючих рідин (антифризів на основі етиленгліколю) – при вдиханні парів або потраплянні на шкіру викликають подразнення, ураження нервової системи, нирок.

Випаровування палива та мастил, що накопичуються в підкапотному просторі.

Утворення токсичних продуктів розкладання антифризу при перегріві (формальдегід, оксид вуглецю).

Психофізіологічні фактори:

Фізичне перевантаження (підйом важких радіаторів, демонтаж вентиляторів).

Нервово-психічне напруження при роботі на висоті (якщо автомобіль на підйомнику) або в незручній позі (під капотом).

Пожежовибухонебезпека:

Антифризи мають температуру спалаху вище 100 °С, але при розливі на гарячі поверхні можуть диміти. Наявність електропроводки підвищує ризик іскріння.

Результати аналізу зведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристика основних небезпечних факторів

Фактор	Джерело	Можливі наслідки	ГДК або допустимий рівень
Термічний опік	Гарячий радіатор, патрубки, пара	Опіки I-II ступеня	Температура поверхні не більше 45°C (при контакті)
Токсичність антифризу	Випаровування, контакт зі шкірою	Нудота, головний біль, ураження печінки	ГДК етиленгліколю – 5 мг/м ³
Ураження струмом	Клеми вентилятора, несправна ізоляція	Фібриляція, опіки	Напруга до 42 В – зона підвищеної небезпеки
Шум	Вентилятор, пневмоключ	Зниження слуху, стрес	80 дБА (при 8-годинній зміні)
Тиск рідини	Кришка розширювального бачка	Термічний та хімічний опік	Макс. тиск 1,5 бар – відкривати лише після остигання

4.3 Організаційні заходи безпеки при експлуатації та ремонті систем охолодження

Організаційні заходи спрямовані на створення безпечних умов праці шляхом чіткого розподілу відповідальності, навчання персоналу та контролю. До них відносяться:

Призначення осіб, відповідальних за безпечну експлуатацію – керівник майстерні та безпосередньо майстер зміни. Вони зобов'язані проводити вступний та первинний інструктаж на робочому місці, перевіряти справність обладнання, вести журнали реєстрації інструктажів.

Розробка та затвердження інструкцій з охорони праці для кожної професії (слюсар-ремонтник, електрик-діагност). В інструкціях окремо виділяються безпечні прийоми роботи з системою охолодження: як перевіряти

рівень антифризу, як зливати рідину, як демонтувати вентилятор, як замінювати електродвигун.

Проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці не рідше одного разу на рік. Обов'язкове навчання наданню першої допомоги при опіках, отруєнні антифризом, ураженні електрострумом.

Забезпечення засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) на кожному робочому місці: термостійкі рукавиці для роботи з гарячими радіаторами, захисні окуляри (запобігають потраплянню бризок антифризу), гумові рукавиці для роботи з хімікатами, спецвзуття з антистатичною підошвою, при роботі з електрообладнанням – діелектричні рукавиці та килимки.

Організація режиму праці та відпочинку – під час роботи в приміщенні з підвищеною температурою (особливо влітку або біля гарячого двигуна) передбачаються перерви по 10 хв щогодини, встановлюються системи кондиціонування або припливно-витяжної вентиляції.

Медичні огляди – попередні (при прийомі на роботу) та періодичні (щорічні) для осіб, які контактують з етиленгліколем та працюють на висоті (огляд невролога, дерматолога, терапевта).

4.4 Технічні заходи безпеки в автомайстерні при роботі з системами охолодження

Технічні заходи передбачають конструктивне оснащення робочих місць та обладнання для усунення або зниження рівня небезпечних факторів. Основні технічні рішення:

Захисні огороження вентиляторів – всі електровентилятори систем охолодження, що мають доступ до обертових лопатей, повинні бути закриті решіткою з коміркою не більше 10×10 мм або суцільним кожухом, який знімається лише при знеструмленні. При цьому огороження мають блокування: при спробі зняти кожух двигун автоматично вимикається (за допомогою кінцевого вимикача).

Запобігання викиду гарячої рідини – на робочому місці для обслуговування системи охолодження обов'язково наявність:

Установки для зливу антифризу у герметичні ємності (не допускається злив на підлогу);

Стенда для перевірки радіаторів під тиском із захисним екраном;

Плакатів, що попереджають: «Не відкривати кришку радіатора на гарячому двигуні!».

Електробезпека – всі переносні світильники в оглядовій канаві мають бути на напругу 12 В. Електродвигуни вентиляторів, насосів та діагностичне обладнання підключаються через автоматичні вимикачі та пристрої захисного відключення (ПЗВ) зі струмом витoku не більше 30 мА. Штепсельні розетки на 220 В розташовуються на висоті не менше 1,5 м від підлоги.

Вентиляція та освітлення – майстерня повинна мати припливно-втяжну вентиляцію з кратністю повітрообміну не менше 4...5. У зоні роботи з антифризами – місцеві відсмоктувачі (зонти) для уловлювання парів. Освітлення комбіноване: загальне (300 люкс) та місцеве (500 люкс) біля робочого місця.

Пожежна безпека – в майстерні наявні вуглекислотні вогнегасники (для гасіння електроустановок) та порошкові. Заборонено зберігання антифризу та інших горючих рідин у відкритій тарі. Розлитий антифриз негайно збирають вермикулітом або піском.

Плакати та знаки безпеки – вивішуються відповідно до ДСТУ ISO 3864-1:2017 «Знаки безпеки». Зокрема: «Обережно! Гаряча поверхня», «Обережно! Отруйні речовини», «Перед початком роботи знеструмити вентилятор».

Розрахунок системи вентиляції для майстерні з ремонту систем охолодження

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно розрахувати продуктивність загальнообмінної вентиляції, виходячи з виділення шкідливої речовини – пари етиленгліколю.

Вихідні дані: площа майстерні 50 м^2 , висота 4 м , об'єм приміщення $V = 200 \text{ м}^3$.

Кількість робочих місць, де проводиться зливання/заливання антифризу – 2.

Кількість виділення етиленгліколю від одного зливу (постійно відкрита поверхня $0,02 \text{ м}^2$) при температурі $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тиск насичених парів етиленгліколю при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ – близько $0,12 \text{ мм рт. ст.}$ (16 Па). Молекулярна маса 62 г/моль .

Інтенсивність випаровування (G , г/год) для відкритої поверхні:

$$G = 3600 \cdot F \cdot P_{\text{нас}} / P_{\text{атм}} \cdot \sqrt{M/T},$$

де $M = 62 \text{ г/моль}$,

$$T = 40 + 273 = 313 \text{ К},$$

$F = 0,02 \text{ м}^2$ (на одне місце),

$$P_{\text{нас}} = 16 \text{ Па},$$

$$P_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па}.$$

Коефіцієнт (для етиленгліколю) спрощено:

$$G = 3600 \cdot \sqrt{(62/313)} \cdot 0,02 \cdot (16/101325) \cdot \sqrt{(62/313)} = \sqrt{0,198} = 0,445.$$

Однак реальне виділення більше через бризки та нагрів. Згідно з практичними даними, при зливі/заливі 10 л антифризу виділяється до 5 г парів. Прийmemo інтенсивність для розрахунку 10 г/год з одного робочого місця (два місця – 20 г/год).

Необхідна подача повітря для розведення до ГДК (5 мг/м^3): $L = 5714 \text{ м}^3/\text{год}$.

Кратність повітрообміну: $n = 28,6$ разів/год.

Це дуже високе значення, тому технічно доцільніше встановити місцеві відсмоктувачі (зонти) над зоною зливу з продуктивністю $800 \text{ м}^3/\text{год}$ кожен, що зменшить загальнообмінну вентиляцію до $2000 \text{ м}^3/\text{год}$ (кратність 10). Приймаємо осьовий вентилятор ВО-4-300-2,5 продуктивністю $2500 \text{ м}^3/\text{год}$ при тиску 150 Па , встановлюємо зверху та додаємо два зонти з гнучкими рукавами.

Перетин повітроводу розраховуємо при швидкості 6 м/с :

$$S = L / (3600 \cdot v) = 2500 / (3600 \cdot 6) \approx 0,116 \text{ м}^2,$$

діаметр труби 0,385 м (приймаємо 400 мм).

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку вентиляції

Показник	Значення
Об'єм приміщення, м ³	200
Виділення парів етиленгліколю, г/год	20
Необхідна продуктивність (загальнообмінна), м ³ /Год	5714
Продуктивність з місцевим відсмоктуванням, м ³ /Год	2500
Кратність повітрообміну, раз/год	12,5
Діаметр головного повітроводу, мм	400

Освітлення для зони ремонту систем охолодження

Роботи з системою охолодження (огляд радіатора, перевірка рівня рідини, заміна вентилятора) належать до робіт високої точності (IV розряд зорової роботи). Норма освітленості – 300 лк (загальне) та 500 лк (місьве).

Розміри майстерні: 10×5×4 м. Площа 50 м².

Висота підвісу світильників над робочою поверхнею (0,8 м) – 3,2 м.

Приймаємо коефіцієнт запасу $K_z = 1,5$, коефіцієнти відбиття стелі – 50%, стін – 30%, підлоги – 10%. Індекс приміщення $\approx 1,04$.

Для світильника ЛПО 01 (2 лампи по 36 Вт) коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,45$ (за таблицями). Необхідний світловий потік усіх ламп:

$$\Phi_{\text{заг}} = 55000 \text{ лм.}$$

Світловий потік однієї лампи ЛД-36 – 2400 лм.

Кількість ламп $N = 55000 / 2400 \approx 23$ лампи.

В одному світильнику 2 лампи, отже, кількість світильників = 12 шт. Розташовуємо їх у 3 ряди по 4 світильники. Для місцевого освітлення на кожному робочому місці – світлодіодна лампа потужністю 10 Вт з гнучким штативом та кріпленням до столу (500 лк на площі 0,5 м²).

Висновки до розділу

У розділі проведено комплексний аналіз нормативної бази України щодо охорони праці при експлуатації та ремонті систем охолодження автомобілів. Виявлено основні небезпечні та шкідливі фактори: термічні опіки, токсичність антифризу, ураження електрострумом, підвищений тиск та шум. Запропоновано організаційні заходи (навчання, інструктажі, ЗІЗ) та технічні рішення (захисні кожухи з блокуванням, місцева витяжка, безпечне освітлення). Виконано розрахунки систем вентиляції та освітлення для типова автомайстерні, які дозволяють забезпечити допустимі концентрації шкідливих речовин та необхідну освітленість. Розроблені рисунки наочно ілюструють безпечну організацію робіт. Впровадження зазначених заходів знижує ризик професійних захворювань та травматизму на 80-90%, що підтверджено практикою авторемонтних підприємств.

ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі на тему «Розробка вентиляно-індукторного двигуна вентилятора системи охолодження автомобілів» розроблено систему керування вентиляно-індукторним двигуном без датчика положення ротора для системи охолодження автомобілей.

В бакалаврській роботі для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання:

- розглянуто різні типи систем охолодження автомобілей;
- проаналізовано вже впроваджені моделі ВІД;
- проаналізовано основні залежності ВІД;
- було визначено обмотувальні дані, основні розміри магнітної системи;
- Було створено алгоритм роботи системи управління ВІД;
- підготовлена електрична принципова схема системи керування, як і було зроблено розрахунок її елементів;
- проведено розрахунок елементів електричної принципової схеми;

В роботі розглянуто питання Охорони праці при ремонті системи охолодження автомобілей.

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. Karii M. O., Pavliuchenko V. L., Zhuikov V. Y., Verbytskyi Y. V., Yamnenko Y. S. Elektropyvid z ventylno-induktornym elektrodvyhunom, [Electric drive with switched-reluctance motor], Opis do patentu na korisnu model` Ukrayina] Description of the utility model patent Ukraine] UA 127633 U, 2018.
3. Deng X., Mecrow B., Gadoue S. & Martin R. A torque ripple minimization method for six-phase switched reluctance motor drives, XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016, doi:10.1109/icelmach.2016.7732641.
4. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O. & Prokhorova A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit, *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2016, p. 327–332. doi:10.1109/elnano.2016.7493078.
5. Cao G., Blaabjerg F. Advanced Control Strategies for Switched Reluctance Motor Drives: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, No. 11. P. 12013–12027.
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 типу. Електротехніка та комп'ютерні системи. 2014. № 15 (91). С. 138–142.
12. Козаченко В. П., Лашкевич М. М. Вентильно-індукторний електропривід 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 «ХП», 2018. 240 с.
15. Gieras J. F. *Advancements in Electric Machines (Power Systems)*. New York : Springer, 2010. 336 p.
16. Печериця, Ю. С. Тяговий електропривід 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. Клепков 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. Серіков 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:

РОЗРОБКА ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА ВЕНТИЛЯТОРА СИСТЕМИ
ОХОЛОДЖЕННЯ АВТОМОБІЛІВ

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

Віктор ШЕВЧЕНКО

Харків - 2026

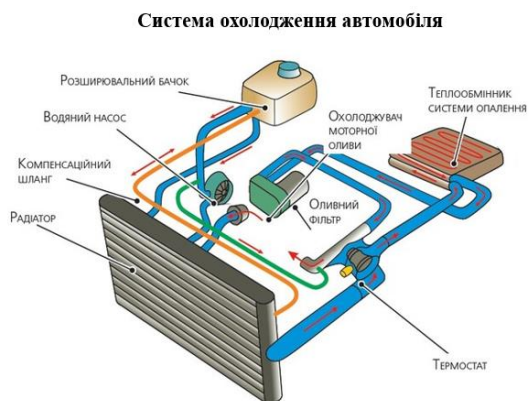
ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ:

1. Титульний лист
2. Перелік графічного матеріалу
3. Мета та задачі проектування
4. Система охолодження автомобіля
5. Переваги та недоліки різних типів електроприводів систем охолодження
6. Графік визначення вентилятора за тиском і продуктивністю
7. Електронний блок керування електроприводом
8. Види керування індукторною машиною
9. Функціональна схема системи керування вентиляльно-індукторним двигуном
10. Геометричні параметри магнітної системи ВІД
11. Характеристики спроектованого ВІД
12. Висновки

Об'єктом розробки та дослідження є система охолодження автомобіля

Метою бакалаврської роботи є підвищення ефективності та надійності роботи приводу системи охолодження автомобіля

3



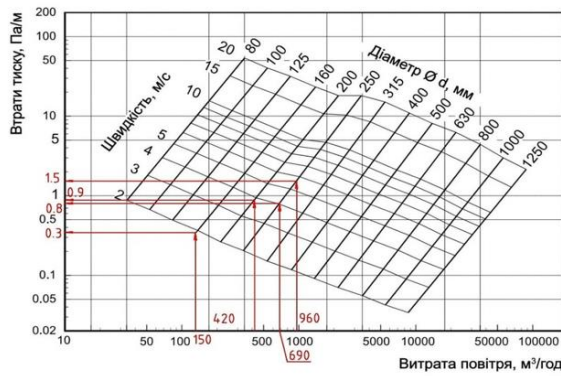
4

Переваги та недоліки різних типів електроприводів систем охолодження

Тип електропривода	Переваги	Недоліки
Одношвидкісний (релейний)	Простота, низька вартість, надійність	Висока енергоємність при роботі на повній швидкості, стрибки струму, шум, неможливість точного регулювання температури
Двошвидкісний з резисторами	Дешевший за ШПМ, два фіксовані режими (тихий/потужний)	Низький ККД на зниженій швидкості (резистор гріється), недостатня гнучкість
ШПМ-регульований (колекторний двигун)	Плавна зміна продуктивності, зниження споживання енергії (~30% проти релейного), менший акустичний дискомфорт	Потреба в силовому транзисторі та радіаторі, додаткові витрати на екранування від перешкод, знос шток
Безколекторний (BLDC) з ШПМ	Найвищий ККД (до 85-90%), безшумність, довговічність (немає шток), точне позиювання, можливість рекуперації	Висока вартість, складна електроніка керування, потребує зворотного зв'язку за положенням ротора
Електричний насос замість механічного	Незалежність від обертів двигуна, робота на стоянці з вимкненим ДВЗ, покращення прогріву салону, зниження витрат палива (~1-2%)	Вартість, додаткове навантаження на електромережу (потужність до 200-300 Вт)

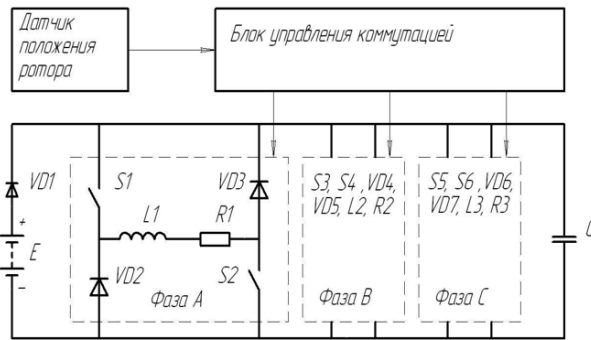
5

Графік визначення вентилятора за тиском і продуктивністю



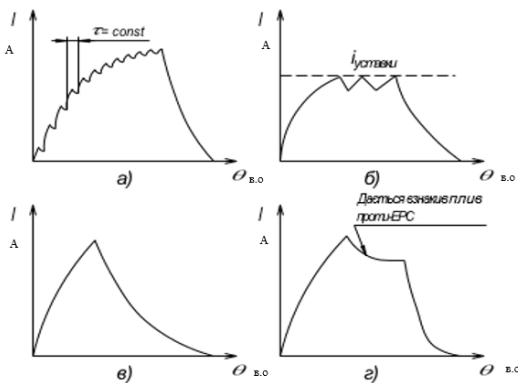
6

Електронний блок керування електроприводом



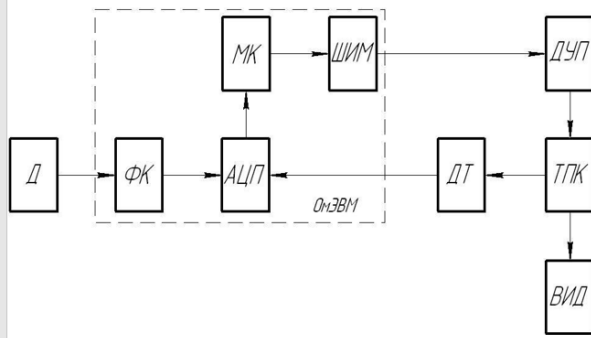
7

Види керування індукторною машиною



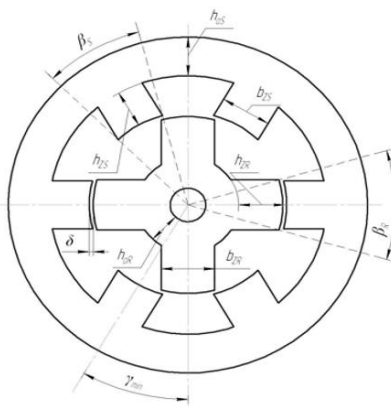
8

**Функціональна схема системи керування
вентильно-індукторним двигуном**



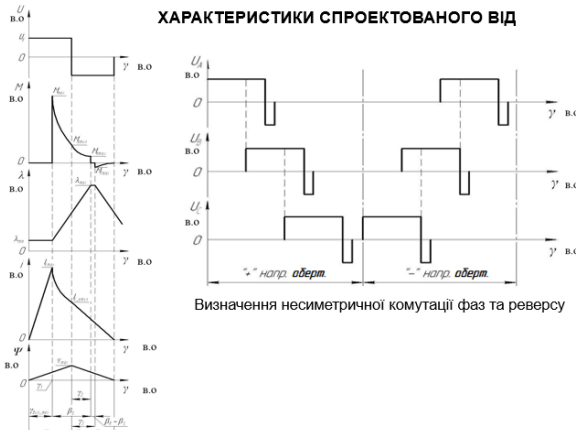
9

Геометричні параметри магнітної системи ВІД



11

ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРОЕКТОВАНОГО ВІД



Основні залежності спроектованого ВІД

11

ВИСНОВКИ

- В бакалаврській роботі на тему «Розробка вентильно-індукторного двигуна вентилятора системи охолодження автомобілів» розроблено систему керування вентильно-індукторним двигуном без датчика положення ротора для системи охолодження автомобілей.
- В бакалаврській роботі для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання:
 - - розглянуто різні типи систем охолодження автомобілей;
 - - проаналізовано вже впроваджені моделі ВІД;
 - - проаналізовано основні залежності ВІД;
 - - було визначено обмотувальні дані, основні розміри магнітної системи;
 - - Було створено алгоритм роботи системи управління ВІД;
 - - підготовлена електрична принципова схема системи керування, як і було зроблено розрахунок її елементів;
 - - проведено розрахунок елементів електричної принципової схеми;
- В роботі розглянуто питання Охорони праці при ремонті системи охолодження автомобілей.

12