



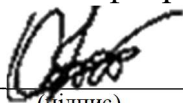
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра суднових електроенергетичних систем

"Допущений до захисту"

В.о. зав. кафедри СЕЕС

 Обрубов А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

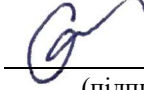
« » травня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

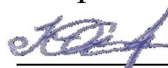
на здобуття ступеня вищої освіти "бакалавр"

на тему: ПРОЕКТУВАННЯ КЕРОВАНОГО ДВИГУНА
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД
ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОГО
СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

Виконав: студент групи 4361

 Лисогор П.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи: ст. викладач

 Александровський С.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра СЕЕС
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка
Освітня програма Електромеханіка та електроенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Валянська Я.Б.
(підпис)

_____ 2026р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІОНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти "бакалавр"

Студенту Лисогору Павлу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування керованого двигуна постійного струму зі збудженням від постійних магнітів для системи зовнішнього спостереження підводного апарату

керівник роботи: ст. викладач каф. СЕЕС Александровський С.Ю.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора № _____ від _____ 2026 року

2. Термін подання роботи: _____

3. Вихідні дані по роботі: Спроектувати керований безконтактний двигун постійного струму, потужністю 3 Вт, частотою обертання 750 об/хв., напругою живлення 24 В для системи спостереження підводного апарату

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):
Розділ 1. Вибір та обґрунтування конструктивної схеми та функціональних елементів БДПС;

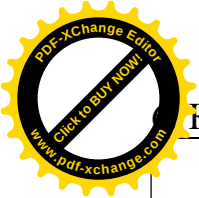
Розділ 2. Розробка безконтактного двигуна постійного струму;

Розділ 3. Розробка системи керування БДПС;

Розділ 4. Охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів:

1. Загальний вид БДПС; 2. Конструкція ДПР; 3. Робоча діаграма магніту; 4. Робочі і механічні характеристики БДПС; 5. Схема електрична принципова БДПС; 6. Механічні характеристики з регулятором частоти обертання і перехідні процеси при пуску БДПС



Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП	Александровський С.Ю.		

7. Дата видачі завдання 21.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Виконання огляду БДПС	21.02.2026	виконано
2	Вибір та обґрунтування конструктивної схеми БДПС	14.03.2026	виконано
3	Проектування БДПС	28.03.2026	виконано
4	Розрахунок характеристик БДПС	11.04.2026	виконано
5	Розробка системи керування	18.04.2026	виконано
6	Виконання спеціальних частин проекту	25.05.2026	виконано
7	Оформлення дипломного проекту та графічної частини	29.05.2026	виконано

Студент


(підпис)

Лисогор П.О.

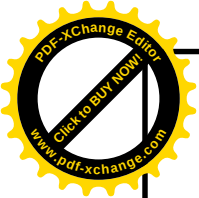
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту


(підпис)

Александровський С.Ю.

(прізвище та ініціали)



АНОТАЦІЯ

В даній дипломній роботі виконано синтез керованого безконтактного двигуна постійного струму (БДПС) зі збудженням від постійних магнітів потужністю 3 Вт, частотою обертання 750 об/хв, та напругою живлення 24 В для системи зовнішнього спостереження підводного апарату.

При проектуванні були розглянуті наступні питання: аналіз достоїнств та недоліків існуючих типів двигунів постійного струму, вибір оптимального типу конструкції для проектування, визначення головних розмірів двигуна, розрахунок магнітного кола, оцінка стійкості постійного магніту до розмагнічування, розрахунок і побудова робочих, механічних та регулювальних характеристик двигуна, перевірка температурного режиму, розрахунок ККД, розробка датчика положення ротора, синтез системи керування, розрахунок перехідних процесів при пуску двигуна.

Також у дипломній роботі розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: безконтактний двигун постійного струму; підводний апарат; розробка датчика положення ротора

ABSTRACT

In this thesis, a synthesis of a controlled contactless direct current motor (CDDM) with excitation from permanent magnets with a power of 3 W, a rotation speed of 750 rpm and a supply voltage of 24 V for an external observation system of an underwater vehicle is carried out.

During the design process, the following issues were considered: analysis of the advantages and disadvantages of existing types of DC motors, selection of the optimal design type for the design, determination of the main dimensions of the motor, calculation of the magnetic circuit, assessment of the resistance of the permanent magnet to demagnetization, calculation and construction of the operating, mechanical and control characteristics of the motor, temperature control testing, efficiency calculation, rotor position sensor development, control system synthesis, engine start-up transient analysis.

The thesis also addressed issues of labor protection and safety regulations.

					141. 4361. БР. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		3



ЗМІСТ

Вступ	6
1. Вибір та обґрунтування конструктивної схеми та функціональних елементів БДПС	11
1.1. Достоїнства і недоліки колекторного двигуна постійного струму	12
1.2. Вибір структурної схеми БДПС	13
1.3. Схема обмотки БДПС	18
1.4. Вибір схеми комутатора БДПС	22
1.5. Обґрунтування вибору типу датчика положення ротора	23
1.6. Вибір датчика швидкості	27
2. Розрахунок безконтактного двигуна постійного струму	31
Вступ	32
2.1. Вихідні дані для розрахунку	33
2.2. Розрахунок основних параметрів двигуна	34
2.3. Розрахунок характеристик БДПС	55
2.4. Розробка ДПР	59
2.5. Обґрунтування вибору датчика швидкості	64
2.6. Визначення постійної часу двигуна	66
3. Розробка системи керування БДПС	69
3.1. Опис роботи схеми БДПС з регулятором частоти обертання	70
3.2. Визначення параметрів елементів БК	75
3.3. Розрахунок регулювальних і механічних характеристик БДПС	76
3.4. Електромеханічні перехідні процеси при пуску БДПС	79
4. Охорона праці при експлуатації СЕЕС	82
Вступ	83
4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що виникають при роботі СЕЕС	84
4.2. Заходи щодо зниження впливу на людей небезпечних і	85



шкідливих факторів на судні

4.3. Розробка заходів щодо забезпечення електро - і вибухобезпеки устаткування СЕЕС	85
4.4. Розрахунок рівня шуму в машинному відділенні	87
Висновки по дипломній роботі	90
Додатки	91
Додаток А. Розрахунок реверсивної проникності постійного магніту, виконаного зі сплаву ЮНДК18	92
Додаток Б. Залежності напруженості магнітного поля й індукції в повітряному зазорі від питомої провідності магніту, виконаного зі сплаву ЮНДК18	94
Додаток В. Програма для розрахунку механічних характеристик БДПС с регулятором частоті обертання	97
Додаток Г. Програма для розрахунку перехідних процесів при пуску БДПС	99
Додаток Д. Перелік конструктивних елементів БДПС	101
Список використаної літератури	102

					141. 2367ст. БР. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		5



					141. 4361. БР. ПЗ. В.			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Лисогор П.О.							
Керівник	Александровський						6	5
Консульт.						ННІАЕ НУК		
Н. контр.								
В.о.зав каф.	Обрубов А.В.							

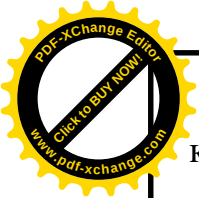


ВСТУП

Як правило, основними вимогами до проектового пристрою є надійність, довговічність, безпека і необхідне співвідношення ціна – якість. Науково-технічний прогрес і зміни в соціально – економічному житті суспільства, як правило, відбиваються на якісному співвідношенні перерахованих вище вимог і ставлять перед проектуванням нові задачі. Перелічимо задачі сучасного проектування:

- підвищення надійності без збитку ціни проектового виробу чи навіть зниження його вартості, тому що наша держава перейшла на ринкову економіку, у якій існують такі поняття як конкуренція, рентабельність, окупність і т.д., що не надає право істотно підвищувати ціну на виріб, до чого неодмінно веде підвищення надійності. Значить ще на стадії проектування необхідно застосовувати кардинальні рішення і новації для досягнення необхідного значення відношення ціна – якість;
- підвищення екологічної чистоти продукції, що випускається, тому що насущною проблемою в наш час стала підтримка екології нашої планети в належному стані. Тепер людство бореться не тільки за життя «братів наших менших» - тварин і рослин, але і за своє життя. Тому при проектуванні і виробництві необхідно враховувати такі питання, як, наприклад, утилізація виробу після закінчення терміну служби, застосування спеціальних фільтрів для продуктів горіння, перехід на більш екологічно чисті види палива і т.д.;
- спрощення конструкції і технічного обслуговування виробу, що також веде до здешевлення, а значить і до підвищення конкурентноздатності.

Електричні автоматичні пристрої, серед яких особливе значення мають системи, що стежать, і приводи малої потужності, одержали в даний час дуже широке поширення в цілому ряді областей техніки. Дистанційне



керування виробничими процесами, прилади і пристрої науково-дослідного устаткування, бортова автоматика літальних і підводних апаратів, звукозаписна апаратура й інші – от далеко не повний перелік областей застосування цих пристроїв [1,5]. Сучасні темпи технічного прогресу з кожним роком розширюють цей перелік, а розвиток нових напрямків науки і техніки створює передумови для появи зовсім нових пристроїв електроавтоматики.

Виконавчими двигунами автоматичних пристроїв у більшості випадків є електричні двигуни, що впливають на весь автоматичний комплекс, визначаючи структуру і схему керування, а також на такі характеристики системи, як енергоспоживання, вага, динамічні властивості, надійність. Якість сучасних пристроїв, зокрема систем керування, що використовують мікроелектродвигуни, визначається рядом показників, серед яких можна виділити головні: довговічність і надійність. Велике значення цих показників в оцінці систем регульованого мікроприводу визначило масове поширення в них надійних і простих асинхронних мікродвигунів з порожнім ротором чи з ротором типу білячої клітки, а також синхронних реактивних і гістерезисних двигунів. Однак цим сприятливим якостям часто були принесені в жертву інші параметри двигунів перемінного струму: ККД, габарити, вага [1,10]. У системах керування з глибоким регулюванням швидкості часто потрібна висока лінійність регульовальної і механічної характеристик, а забезпечення такої лінійності натрапляє на труднощі. У приводах, що вимагають сталості швидкості обертання й особливо сталості миттєвої швидкості (різні стрічкопротягувальні механізми), застосування синхронних двигунів найчастіше не дає бажаного ефекту через схильність ротора до хитань [3].

У приладах і пристроях з батарейним живленням застосування двигунів перемінного струму вимагає наявності перетворювача, що, крім ускладнення схеми, погіршує вагові й енергетичні показники.

Таким чином, існує клас задач, де в принципі більш удале технічне

					141. 4361 БР. ПЗ. В.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8



рішення можна одержати при використанні двигунів постійного струму. насамперед, двигунів з постійними магнітами. В даний час існуючі магнітотверді матеріали дають можливість створювати малогабаритні високоекономічні машини потужністю до 1000...1500 Вт [2,3].

Двигуни цього типу мають не тільки малу вагу на одиницю потужності і високий ККД, але і лінійну механічну характеристику. При керуванні по колу якоря їхня регульовальна характеристика також лінійна.

Області застосування двигунів постійного струму з постійними магнітами відносяться до систем, встановлених на рухливих об'єктах; до переносних приладів і пристроїв з батарейним живленням; до систем, де однією з основних вимог є мале енергоспоживання і вага. Суттєвим бар'єром у використанні двигунів постійного струму є наявність щітково-колекторного апарата, що знижує надійність машини, служить джерелом радіоперешкод, акустичного шуму і пилу, який засмічує підшипникові вузли [1,3]. Крім цього, при роботі у вибухонебезпечному середовищі застосування колекторного вузла просто небезпечно. У ряді випадків цей бар'єр стає нездоланим і, незважаючи на переваги щіткових двигунів постійного струму з магнітоелектричним збудженням по енергоспоживанню, вазі, лінійності характеристик, вони не можуть конкурувати з більш надійними і безпечними безконтактними двигунами перемінного струму.

Стає зрозумілим, наскільки актуальною є задача створення безконтактних машин постійного струму, що сполучають у собі як високі регульовальні й енергетичні показники колекторних двигунів постійного струму, так і високу надійність двигунів перемінного струму.

Розвиток напівпровідникової техніки зробив реальним рішення цієї задачі шляхом заміни щітково – колекторного апарату безконтактним напівпровідниковим комутатором. Особливістю таких схем є також можливість керування двигуном без застосування додаткового скільки-небудь потужного підсилювача. Його функції може виконувати

					141. 4361 БР. ПЗ. В.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9



напівпровідниковий комутатор, що заміняє колекторний апарат [1].

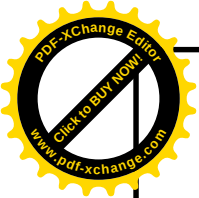
Таким чином, з огляду на всі переваги безконтактного двигуна постійного струму (БДПС), можна зробити висновок про доцільність його розробки і необхідності його переважного використання як заміни колекторних двигунів постійного струму.

В даний час при усестороннім освоєнні світового океану, що розширюється, усе більший розвиток одержує підводна техніка, у тому числі населені і ненаселені підводні апарати, застосовувані як для проведення різних ремонтних, рятувальних операцій, так і для науково-дослідних, геологорозвідувальних робіт. Однією з умов надійного функціонування підводного апарата в умовах підвищеної небезпеки є наявність можливості контролю, спостереження і реєстрації даних заборотної обстановки. У даній роботі розглянутий приклад використання регульованого реверсивного безконтактного двигуна постійного струму в системі позиціювання відеокамери забортного спостереження підводного апарата.

					141. 4361 БР. ПЗ. В.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10



					141. 4361. БР. ПЗ. Р1			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Вибір та обґрунтування конструктивної схеми та функціональних елементів БДПС	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Лисогор П.О.							
Керівник	Александровський С.Ю.						11	20
Консульт.						ННІАЕ НУК		
Н. контр.								
В.о. зав. каф.	Обрубов А.В.							



1. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ БДПС

1.1. Достоїнства і недоліки колекторного двигуна постійного струму

Одним з радикальних шляхів підвищення надійності, розширення функціональних можливостей і поліпшення загальних характеристик електричних машин є відмовлення від використання щіткових електричних контактів і перехід до безконтактних електричних машин. Справедливість цього положення підтверджується наступним. По наявним статистичним даним щітковий контакт при нормальних умовах роботи поряд з ізоляцією і підшипниковими вузлами викликає найбільше число відмовлень у роботі електричних машин.

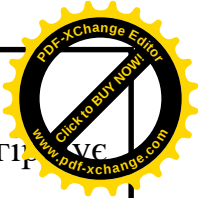
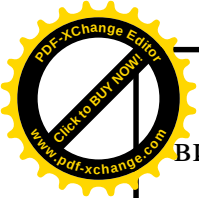
Щітковий контакт істотно обмежує припустиму швидкість ротора електричної машини. Для більшості випадків граничні лінійні швидкості в контакті не перевищують 80...100 м/с. У той же час відомо, що потужність електричних машин при заданих електромагнітних навантаженнях пропорційна частоті обертання ротора [1].

Тому наявність контакту не дозволяє реалізувати високо-виконавчі конструкції електричних машин, розрахованих на граничні механічні навантаження і які мають найкращі масогабаритні показники.

При нестандартних умовах навколишнього середовища (підвищена вологість, запилення, висока температура і т.д.) щітковий контакт в електричних машинах або різко погіршує свою роботу, або взагалі стає непрацездатним. Наявність щіткового контакту неприпустима в присутності займистих газів чи парів. Також він погано працює при вібраційних навантаженнях [3].

Щітковий контакт ускладнює обслуговування електричної машини, забруднює внутрішні порожнини електричної машини графітовим пилом, що знижує електричну міцність ізоляції, перешкоджає використанню в машині

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12



високоєфективного струминного рідинного охолодження, погіршує стабільність параметрів машини, також створює додаткові електричні і механічні втрати і є джерелом шумів і перешкод.

Усе вищевикладене робить зрозумілим інтерес до безконтактних машин постійного струму і визначає їхній швидкий розвиток.

1.2. Вибір структурної схеми БДПС

Запропоновані в даний час безконтактні двигуни постійного струму будуються, як правило, за схемою, приведеної на рис.1.1 [1]. Обмотка двигуна О розташовується на статорі С, а система збудження виконується у виді постійного магніту, що утворює ротор двигуна Р. Транзисторний комутатор ТК, що виконує роль колектора і переключає секції обмотки, керується від датчика положення ротора двигуна щодо статора. Звичайно використовується безконтактний датчик положення, тип якого найчастіше визначається схемою транзисторного комутатора і призначенням двигуна. Чуттєві елементи датчика положення ЕД, що генерують вихідні сигнали, розташовуються на статорі, а з валом двигуна зв'язується якір датчика ЯД, від конфігурації якого залежить порядок чергування і тривалість сигналів чуттєвих елементів датчика.

Існує різний підхід до розгляду безконтактного двигуна постійного струму. Зокрема, безконтактний двигун розглядається як конструктивне об'єднання синхронного двигуна з інвертором, у якого частота вихідної напруги визначається швидкістю обертання ротора двигуна. Однак саме та особливість, що частота переключення секцій обмотки регулюється автоматично самою машиною, завдяки наявності позиційного зворотного зв'язку ротора стосовно статора, характерна для колекторної машини і дозволяє розглядати безконтактний двигун постійного струму як аналог колекторного двигуна з незалежним збудженням. Причому відзначимо, і це істотно, що всі характеристики їх ідентичні.

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		13

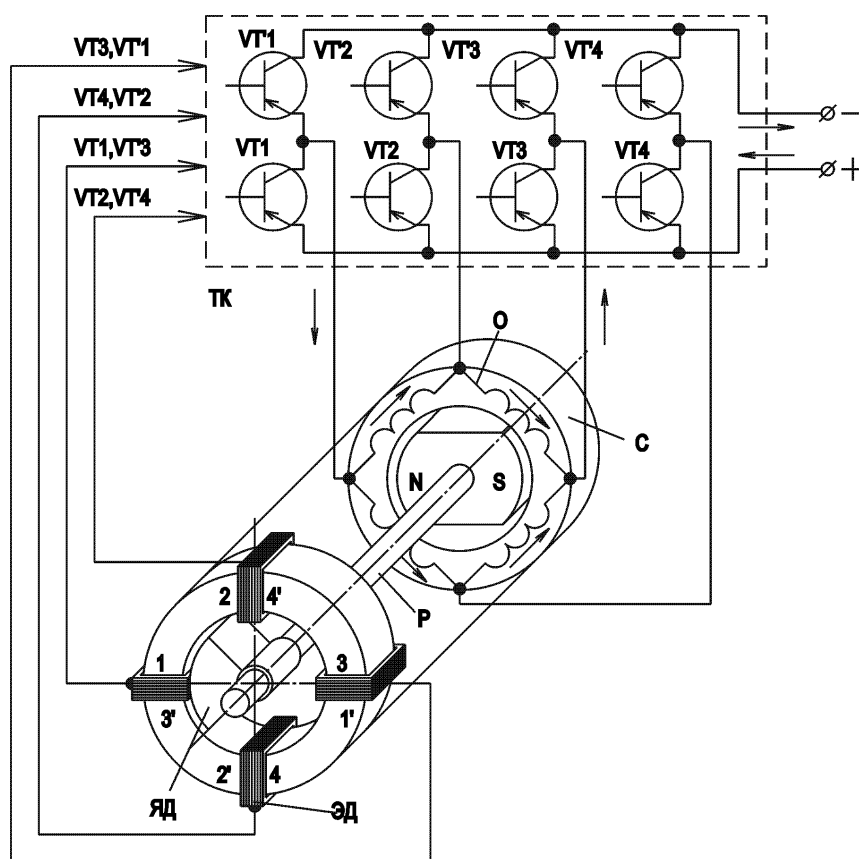


Рис.1.1 Принципова схема безконтактного двигуна постійного струму

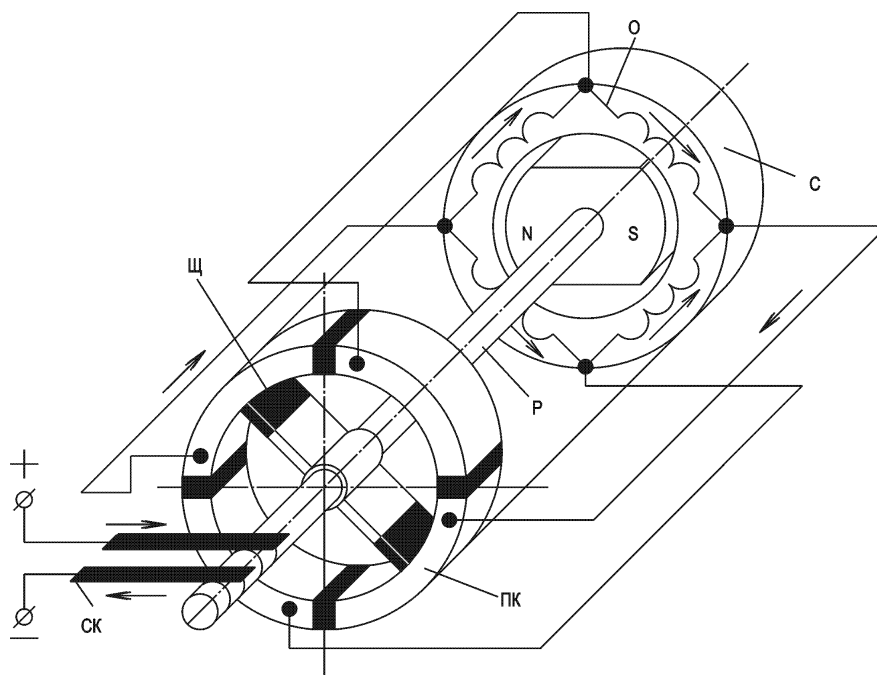


Рис.1.2. Принципова схема колекторного двигуна постійного струму поверненої конструкції

Обмотка двигуна О и колектор розташовані на статорі, а щітки Щ и постійний магніт збудження — на роторі двигуна. Напряга до щіток

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141. 4361. БР. ПЗ. Р1

Лист

14



підводиться через ковзні контакти КК. Очевидно, що напрямок струму в секціях обмотки залежить від положення ротора стосовно статора двигуна, а частота переключення секцій визначається швидкістю обертання. Звичайно, зображена схема конструктивно нераціональна, однак вона дозволяє здійснити наочний перехід до безконтактної моделі двигуна постійного струму, показаної на рис. 1.1, у якій роль колектора виконують силові транзистори $VT2...VT4$, а функцію зворотного зв'язку здійснює датчик положення.

Система елементів датчика ЕД, чуттєвих до переміщення якоря датчика, еквівалентна системі колекторних пластин ПК. Посилені сигнали чуттєвих елементів відмикають відповідні силові транзистори, підключаючи секції обмотки двигуна до джерела живлення. У положенні ротора, зазначеному на рисунку, чуттєвий елемент датчика ЕД відмикає транзистори $VT1$ і $VT'3$.

Наведені міркування визначають підхід до розгляду безконтактного двигуна постійного струму як до машини постійного струму.

Розмаїтість прийомів і способів керування швидкістю БДПС можна звести до двох структурних схем (рис.1.3, а і б) . На схемі (рис.1.3, а) весь потік потужності від джерела живлення БЖ проходить через блок керування БК, що представляє собою підсилювач лінійного, релейного або імпульсного типу, керований сигналом U_y . Далі потік потужності, перетворений відповідно до обраного закону керування, обумовленим типом підсилювача БК і характером зворотних зв'язків $F(\Omega)$, $F(I)$, надходить на комутатор К і розподіляється їм по секціях двигуна ДПС. Цей розподіл забезпечується датчиком положення ротора (ДПР) за рахунок позиційного зворотного зв'язку по куту положення ротора α . Двигун ДПС має датчик швидкості ДШ, що виробляє сигнал зворотного зв'язку по швидкості $F(\Omega)$.

На схемах (рис.1.3, а і б) показаний також зворотний зв'язок по струму $F(I)$, однак функції її полягають в основному струмообмеженні при пуску двигуна. Відмінною рисою структурної схеми рис.1.3, а є наявність блоку

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		15

керування БК, розрахованого на повну потужність, споживану ДПС у процесі керування.

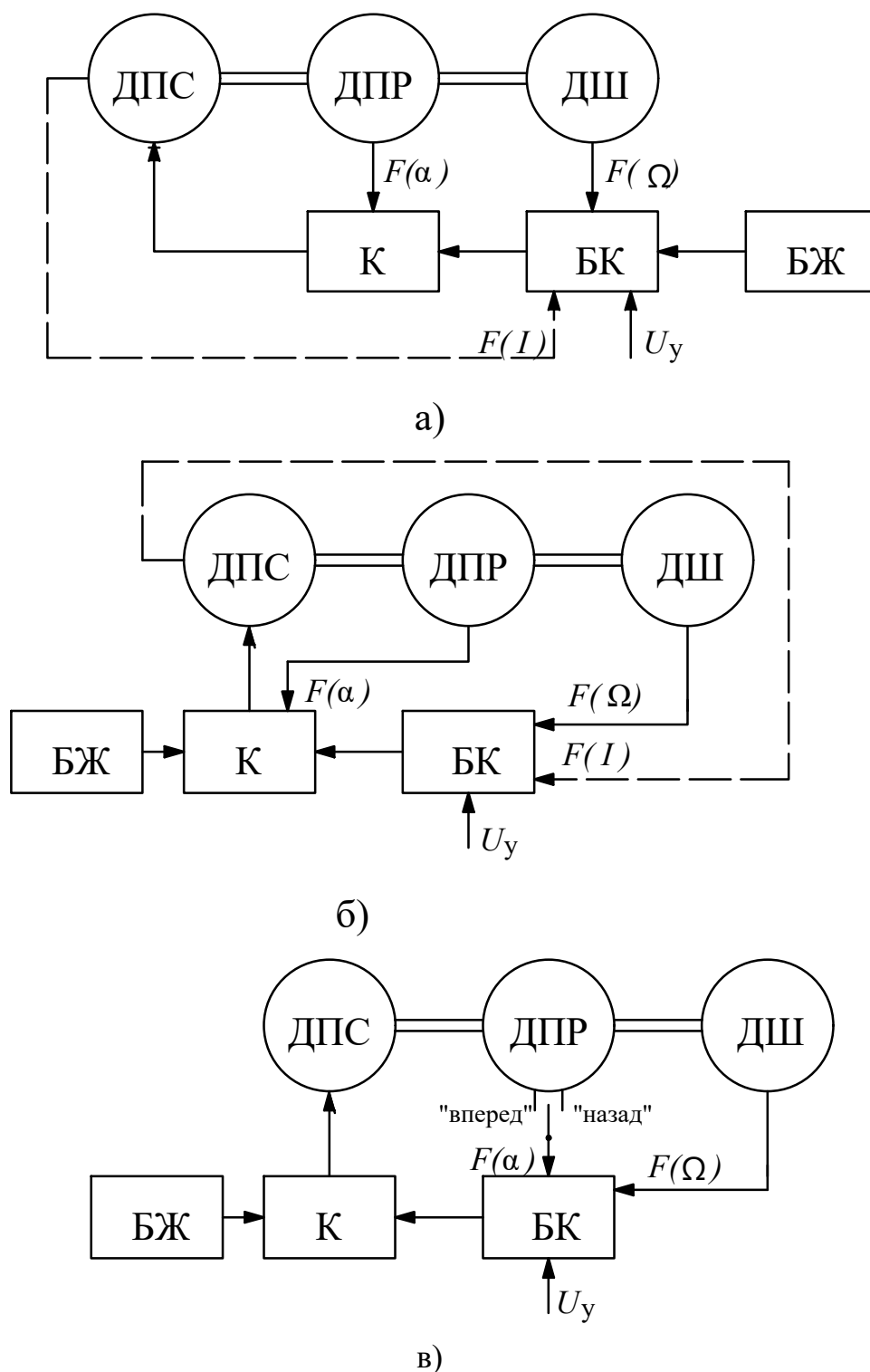
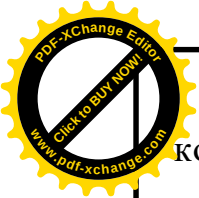


Рис.1.3. Структурні схеми керованих БДПС

На рис.1.3, б потік потужності від БЖ надходить безпосередньо на комутатор К двигуна. БК впливає на комутатор за допомогою сигналів малої потужності. Таким чином, функцію керованого підсилювача виконує сам



комутатор К, а блок керування БК лише формує керуючу функцію. Установлена потужність БК у схемі (рис.1.3,б) виявляється в багато разів менше, ніж у схемі (рис.1.3,а), що має визначені переваги у відношенні габаритів і простоти всієї схеми.

У даному дипломному проекті ставиться задача по розробці керованого, реверсивного БДПС з стабілізацією швидкості обертання, структурна схема якого представлена на рис.1.3, в.

Основними елементами безконтактного двигуна постійного струму і його системи керування є:

- 1) безпосередньо двигун ДПС з силової обмоткою, розташованою на статорі, і ротором у виді постійного магніту;
- 2) безконтактний датчик положення ротора ДПР, за допомогою якого визначаються моменти комутації струму в силовій обмотці двигуна;
- 3) безконтактний (транзисторний) комутатор ТК, що здійснює комутацію силових обмоток по сигналах датчика положення;
- 4) блок керування БК, що реалізує в нашому випадку імпульсний спосіб регулювання ДПС і забезпечує стабілізацію швидкості обертання двигуна;
- 5) датчик швидкості ДШ, що формує сигнал зворотного зв'язку по швидкості, який надходить у блок БК;
- 6) блок живлення БЖ - це джерело необхідних напруг як для силової частини (комутатора ТК та обмотка ДПС), так і для блоку БК і ДПР.

У межах кожного з наведених пунктів можлива розмаїтість конструктивних і схемних рішень, обумовлених призначенням двигуна, умовами його роботи, вимогами до простоти, надійності, економічності всього пристрою. Так, наприклад, обмотки двигуна можуть відрізнятися кількістю секцій, способом їхнього з'єднання і підключення до джерела живлення, конструктивним виконанням.

Збудження двигуна може бути як магнітоелектричним, так і електромагнітним. Ротор двигуна з неоднаковою магнітною провідністю по

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		17



двох перпендикулярних осях дозволяє побудувати безконтактний двигун постійного струму за конструктивною схемою синхронного реактивного двигуна.

Безконтактний датчик положення може бути виконаний з використанням різних фізичних ефектів (трансформаторний і індукційний з перемінним повітряним зазором, датчик ЕРС Холу, фотоелектричний, ємнісний, радіоактивний) [1].

Комутатор двигуна характеризується кількістю безконтактних перемикаючих елементів, їхнім типом, структурою всієї схеми і т.д.

1.3. Схема обмотки БДПС

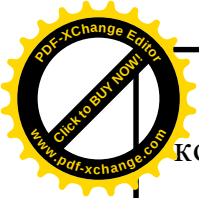
1.3.1. Порівняльний аналіз схем обмоток, застосовуваних у БДПС

Основні характеристики безконтактного двигуна постійного струму, кількість силових перемикаючих елементів комутатора, а також число чуттєвих елементів ДПР визначаються типом використовуваної обмотки і способом її підключення до джерела живлення.

Обмотки безконтактного двигуна постійного струму можна розділити на наступні типи [1] (рис. 1.4):

- замкнуті обмотки (схеми 1 і 2);
 - обмотки з послідовним підключенням секцій до джерела живлення (схеми 3 і 4);
 - обмотки з рівнобіжним підключенням секцій до джерела живлення (схеми 5, 6 і 7);
 - обмотки із секціями, з'єднаними зіркою, променеві обмотки (схеми 8 і 9).
- На рис. 1.4 приведені схеми замкнутих обмоток для числа секцій $S = 3$ і $S = 4$, вони в точності відтворюють обмотку колекторного двигуна постійного струму з відповідним числом секцій. Легко також представити схеми з більшим числом секцій. Однак якщо в колекторному двигуні прагнуть збільшити число секцій для одержання більш сприятливої

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18



комутації, то у безконтактного двигуна в інтересах спрощення схеми транзисторного комутатора і конструкції датчика положення число секцій обмотки по можливості повинне бути зменшено.

1.3.1. Намотування кожної секції замкнутої обмотки провадиться зі зрушенням одна щодо іншої на кут

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{p \cdot S} = \frac{2\pi}{1 \cdot 3} = 2,094 \text{ рад}, \quad (1.1)$$

де $S=3$ – число секцій;

$p=1$ – число пар полюсів.

1.3.2. Число силових перемикаючих елементів (у нашому випадку силових транзисторів), що комутують обмотку, визначається формулою

$$n_T = 2 \cdot S = 2 \cdot 3 = 6 \quad (1.2)$$

Обмотки з послідовним підключенням секцій до джерела живлення для $S = 2$ представлені на схемах 3 і 4 (рис. 1.4). Якщо в схемі 3 струм у секціях при роботі двигуна змінює свій напрямок (реверсування), то в схемі 4 секції розщеплені на дві частини з виводом середньої точки, і в кожен даний момент струм протікає тільки по одній половині кожної секції, тобто струм в окремих половинах секцій не змінює напрямку. У цьому випадку число силових транзисторів комутатора зменшується вдвічі, однак гірше використовується мідь обмотки.

Схеми 5 і 7 відносяться до схем з нереверсивним живленням секцій. Відзначимо, що схема 5 з числом секцій $S = 3$ і трьома силовими транзисторами дозволяє побудувати найбільш простий двигун, що не має мертвих положень ротора.

Для вибору схеми обмоток проектованого БДПС досліджуємо більш докладно електричні і конструктивні характеристики двигунів з різними обмотками.

1.3.2. Вибір оптимальної схеми обмотки

Двигуни, у залежності від обраної обмотки, мають різні характеристики. Для вибору найбільш оптимальної обмотки необхідно

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		19

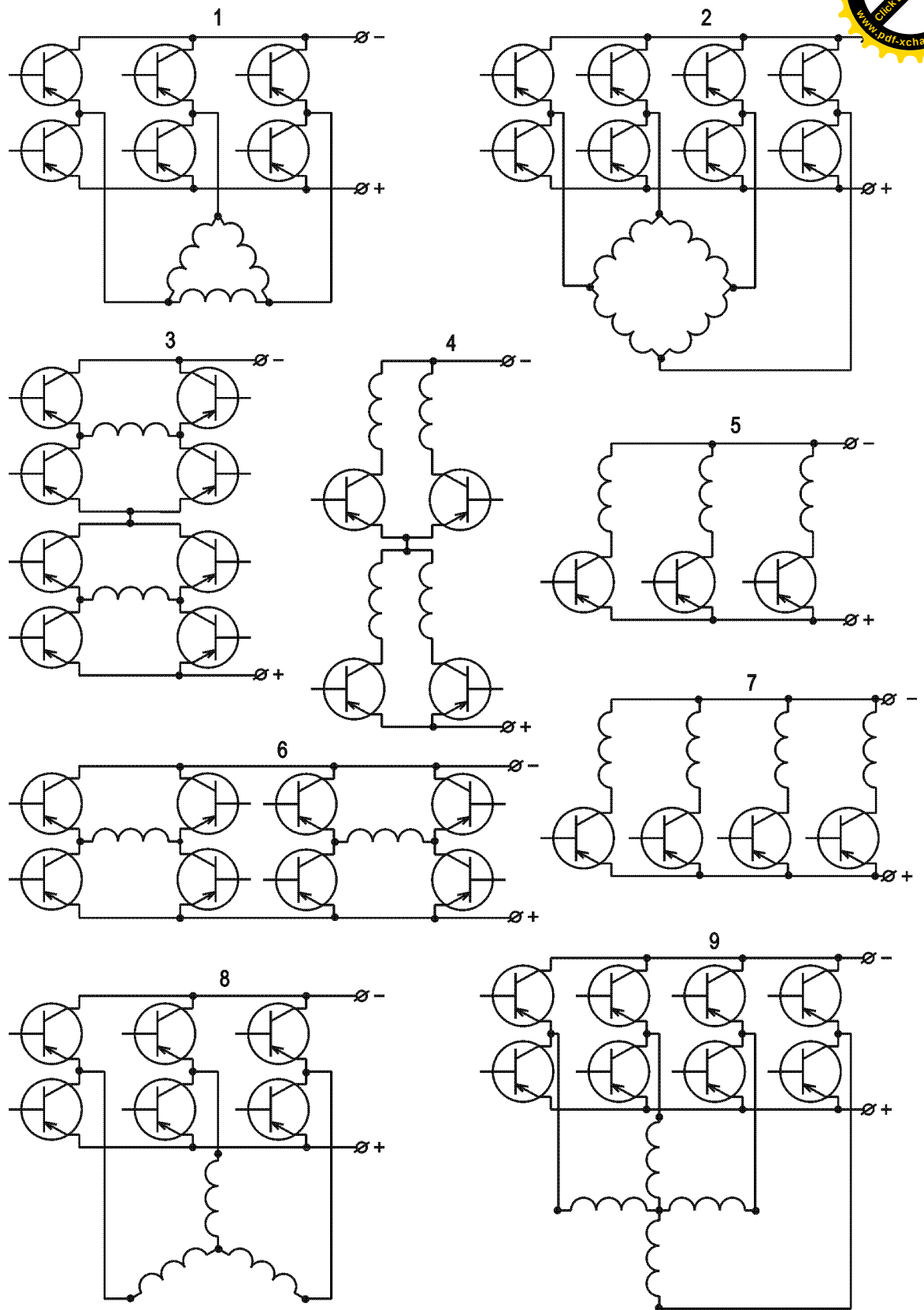


Рис.1.4. Види обмоток БДПС

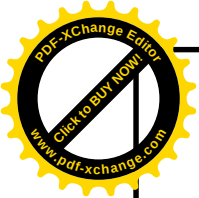
перелічити основні з цих характеристик і указати всі їхні достоїнства і недоліки [10].

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141. 4361. БР. ПЗ. Р1

Лист

20



1) Замкнуті обмотки:

- число секцій $S=3$ – економічний двигун з високим використанням міді;
- число секції $S=4$ – економічний двигун з меншим числом чуттєвих елементів датчика положення, але зі збільшеною кількістю силових транзисторів.

2) Обмотки з послідовним підключенням секцій до джерела живлення:

- число секцій $S=3$ – двигун аналогічний попередньому, але з підвищеною захищеністю від коротких замикань джерела живлення;
- число секцій $S=4$ – економічний двигун зі схемою комутатора підвищеної надійності, спрощеної за рахунок гіршого використання міді;

3) Обмотки з паралельним підключенням секцій до джерела живлення:

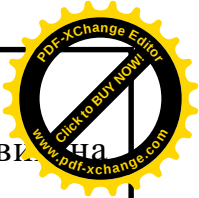
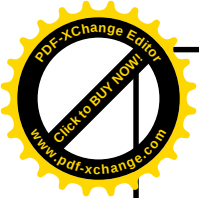
- число секцій $S=3$ – двигун має низький ККД і велике число силових транзисторів. ККД може бути підвищений за рахунок гіршого використання міді;
- число секцій $S=4$ – двигун, до якого пред'являється вимога максимальної простоти схеми комутатора і не пред'являється жорстких вимог по високому використанню об'єму; має задовільний ККД.

4) Променеві обмотки:

- число секцій $S=3,4$ – двигун поступається розглянутим схемам по економічності і переваг не має.

Отже, двигуни, до яких пред'являється вимога найбільшої економічності і мінімальної ваги, повинні будуватися за схемою замкнутої обмотки з числом секцій $S=3$. Економічні двигуни зі спрощеною схемою комутатора і неповним використанням міді можуть виконуватися за схемою з послідовним підключенням і виводом середньої точки від кожної секції. Найпростіші БДПС, що не мають мертвого положення ротора, що відповідають умовам підвищеної надійності, виконуються за схемою паралельного підключення секцій з нереверсивним їхнім живленням при $S=3$, $\beta=120^\circ$, і числі силових транзисторів $n_T = 3$.

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
						21
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



На підставі вищевикладеного для розрахунку безконтактного двигуна постійного струму виберемо обмотку з числом секцій $S=3$.

1.4. Вибір схеми комутатора БДПС

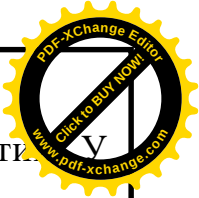
Комутатор безконтактного двигуна постійного струму виконує роль колектора і переключає секції обмотки двигуна у визначеній залежності від відносного розташування магнітних осей обмоток статора й осей полюсів ротора. Він являє собою транзисторні ключі, керовані датчиком положення ротора.

Транзисторна схема комутатора безконтактного двигуна постійного струму, чи просто транзисторний комутатор, переключає обмотки двигуна по сигналах датчика положення. Простота, висока надійність, мала вага і габарити є вирішальними факторами при виборі тієї чи іншої схеми комутатора і типу основних її елементів. Одночасно з виконанням своєї основної функції схема комутатора повинна дозволяти найбільш простим способом керувати двигуном: регулювати швидкість, здійснювати реверс, пуск і зупинку обертання, при цьому з можливо меншими втратами енергії [1,2].

Зі схем обмоток безконтактних двигунів, наведених у п.1.3., видно, що силові транзистори, що комутують секції обмотки, виконують роль ключів, керованих чутливими елементами датчика положення. Незалежно від типу використовуваної обмотки схеми окремих ключів комутатора можуть бути однакові. Ця обставина істотно спрощує виготовлення, експлуатацію і розрахунок транзисторного комутатора безконтактного двигуна. Отже, основним у задачі побудови схеми комутатора є розробка керованого від датчика положення безконтактного економічного ключа, здатного надійно комутувати обмотку двигуна.

Площинні транзистори, що працюють у режимі переключення, по своїх властивостях близькі до властивостей ідеального ключа. Для режиму

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
						22
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



переключення характерні два стани транзистора: закритий чи відкритий. кожнім з цих станів вихідна величина не залежить від конкретного значення вхідної величини. Проміжний стан, що відповідає режиму посилення, розглядається як перехідний з одного крайнього стану до іншого. Опір транзистора в замкненому стані досить великий, а спадання напруги на відкритому транзисторі не перевищує звичайно декількох десятих часток вольт. Час переключення силового транзистора, обумовлений його частотними властивостями, малий і складає 5...50 мкс. На даний час розроблено велике число схем ключів з використанням транзисторів, що працюють у режимі переключення, як стосовно до задач керування двигунами постійного і перемінного току, так і для виконання інших функцій.

Характерною рисою транзисторних ключів є малі втрати в них. При раціональній побудові схеми ККД транзисторних ключів дорівнює 0,8...0,95. Невеликі габарити і вага, висока надійність, а також мала залежність параметрів від температури в досить широкому діапазоні її зміни роблять застосування схем транзисторних ключів надзвичайно сприятливим.

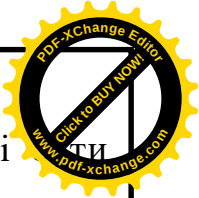
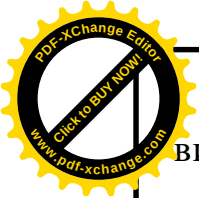
Кількість ключів визначається обраною схемою обмотки двигуна і схемою комутатора. Для малопотужних БДПС вибір однопівперіодної схеми комутації (струм у секціях якірної обмотки не змінює напрямку) обґрунтований можливістю побудови найпростіших схем комутаторів, що зокрема містять три силових транзисторних ключі, що забезпечують надійний пуск і однозначний напрямок обертання двигуна.

1.5. Обґрунтування вибору типу датчика положення ротора

Датчик положення служить для визначення відносного розташування ротора і статора двигуна і керування транзисторною схемою комутатора, називаною надалі транзисторним комутатором.

Датчик положення повинен задовольняти досить складному комплексу

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
						23
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

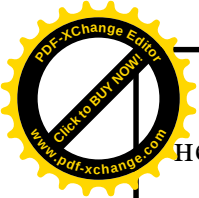


вимог. Насамперед, розміри датчика і споживана їм енергія повинні досить малими, у всякому разі, розміри датчика не повинні перевищувати розмірів щітково-колекторного апарата, а споживання енергії – утрат на щітках еквівалентних колекторних машин. Однією з важливих умов є гарне узгодження датчика з вхідними ланцюгами транзисторного комутатора.

Особливу увагу при проектуванні датчика необхідно приділяти одержанню можливо більшої кратності максимального і мінімального вихідного сигналу, а також більшої крутості наростання і спаду сигналу, що дозволяє без додаткових ускладнень схеми комутатора забезпечити роботу транзисторів у найбільш надійному й економічному режимі переключення. Якщо транзисторний комутатор може бути розташований поза дії середовища, що оточує двигун, то датчик положення конструктивно повинен бути зв'язаний безпосередньо із самим двигуном і повинен працювати в широкому діапазоні робочих температур. До датчика можуть бути пред'явлені також вимоги тривалої роботи в агресивному середовищі, розрідженій атмосфері, при сильних вібраціях, при радіоактивному опроміненні і т.п.

Найбільш відомим є контактний датчик положення. Він може бути зроблений досить простим і компактним. Низька напруга комутації, малі струми, робота на активне навантаження майже цілком виключають електричне руйнування контактів. Саме контактні датчики положення використовувалися у вентильних двигунах для керування сітковими ланцюгами вентилів. Однак ряд умов не дозволяє використовувати контактні датчики в розглянутих двигунах. Так, при розрахунку двигуна на безупинну роботу протягом 5000 год. число замикань датчика має порядок $10^9 \dots 3 \cdot 10^9$, що на кілька порядків більше гарантованого для контактів. При сильній вібрації, в агресивному чи у вибухонебезпечному середовищі робота контактного датчика стає ненадійною і навіть небезпечною. Необхідність систематичного огляду цілком виключає застосування контактного датчика в автономних системах (літальні апарати, ядерні установки і т.п.). Зазначених

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		24



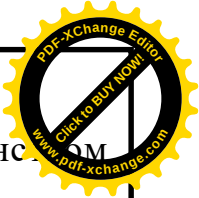
недоліків позбавлені безконтактні датчики.

У літературі мається ряд пропозицій по використанню для розглянутої мети фотодатчиків [5,10]. Фотодатчик містить дві основні частини: джерело світла і чуттєвий до світла елемент. Найбільш придатними джерелами світла, як по споживаній потужності, так і по довговічності є мініатюрні газонаповнені лампи. Елементом, чутливим до світлового потоку, можуть бути фотодіоди або фототранзистори. Фоторезистори, що випускаються в даний час промисловістю, мають велику інерційність. Основним негативним фактором при використанні фотодатчика є обмеження, що накладаються на двигун по діапазону робочих температур, часу дії і споживанню електричної енергії.

Широке поширення одержали безконтактні датчики, що працюють на перемінному струмі: індуктивні, трансформаторні, ємнісні. Достаток конструктивних і електричних схем цих датчиків і використання їх у найрізноманітніших приладах і пристроях пояснюється схемної простотою, відносно високою економічністю. Незважаючи на зазначені позитивні властивості датчиків, що працюють на перемінному струмі, застосування деяких з них у схемі безконтактного двигуна утруднено в силу ряду особливостей. Так, наприклад, ємнісний датчик має великий внутрішній опір, що робить його малопотужним і сильно підданим впливу перешкод-наведень і паразитних ємностей. Необхідність роботи на високій частоті, а також виконання умови узгодження датчика з навантаженням, зв'язано з додатковим ускладненням схеми напівпровідникового комутатора.

Серед датчиків, що працюють на перемінному струмі, найкращі властивості має трансформаторний датчик з якорем, що переміщається. Датчик порівняно простий у виготовленні, може бути розрахований на досить більшу потужність, добре погоджується зі схемою комутатора. Діапазон робочих температур датчика такий, як і у самого двигуна. При відповідному виконанні трансформаторний датчик може надійно працювати при високій вологості, в агресивному середовищі, у сильно розрідженій

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25



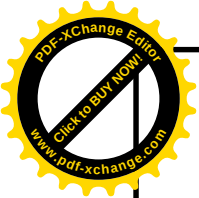
атмосфері й в умовах радіоактивного опромінення. Істотним достоїнством датчика є можливість одержання гальванічно незв'язаних вихідних сигналів.

Однак ДПР з індукційними елементами мають ряд недоліків, таких як: значна трудомісткість виготовлення дроселів і трансформаторів через їхні малі розміри; складність конструкції обойми, де вони розміщуються; збільшення вагогабаритних показників, особливо при використанні датчиків такого типу в реверсивних БДПС, де потрібна подвоєна кількість чутливих елементів. Усе це веде до зниження економічної ефективності виготовлення БДПС з індуктивними ДПР.

Інформацію про положення ротора двигуна можна передавати магнітним полем, використовуючи для цього гальваномагнітні прилади (датчики магнітоопору, магнітодіоди чи генератори Холу). Датчики Холу мають властивість реагувати на знак і величину магнітного поля, на полярність живильної напруги, а постійним магнітом може служити ротор самого двигуна. Вони можуть функціонувати практично необмежений час. В даний час при бурхливому розвитку радіоелектронної промисловості широке поширення одержали спеціалізовані інтегральні мікросхеми, що містять датчики Холу з усіма необхідними для використання в електронних схемах керування елементами (генератори, підсилювачі, компаратори і т.д.) [13]. Незначні розміри (до 3мм), широкий діапазон напруги живлення (до 28В), висока амплітуда, крутість фронту наростання і спаду вихідного сигналу, низький рівень споживаного струму (2мА), висока швидкодія і чутливість (2mT), стійкість до температурних впливів (–40...+150град.С) роблять застосування таких мікросхем доцільним, економічно ефективним, а конструкцію ДПР – малогабаритною, простою і технологічною.

Проаналізувавши достоїнства і недоліки різних двигунів постійного і перемінного току, зокрема конструктивні особливості, схеми обмоток, живлення і т.д., можна цілком точно сказати, що застосування безконтактного двигуна постійного струму в даний час може значно поліпшити характеристики електромеханічних приводів.

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26



1.6. Вибір датчика швидкості

Для керування частотою обертання БДПС і стабілізації її на визначеному рівні з заданою точністю необхідне виділення сигналу, що характеризує частоту обертання, і використання його як сигнал зворотного зв'язку в замкнутій системі регулювання. Конструктивна і схемна розмаїтість двигунів припускає різні способи і пристрої для одержання такого сигналу. У теж час можна сформулювати ряд вимог до датчиків швидкості ДШ, виконання яких дає бажаний позитивний ефект [1].

1. У ДШ повинні бути відсутніми електромеханічні контакти, оскільки сам двигун – безконтактна машина.

2. Датчик повинний живитися напругою, що вже мається в схемі БДПС.

3. Основні технологічні процеси виготовлення датчика швидкості повинні бути однотипні з процесами виробництва двигуна або комутатора.

4. У замкнутій системі стабілізації частоти обертання двигуна немає необхідності пред'являти до ДШ тверді вимоги по нелінійності й асиметрії вихідної характеристики. Основною вимогою є вимога малої додаткової погрішності, що визначається відхиленнями зовнішніх умов від нормальних.

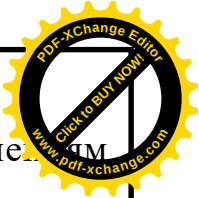
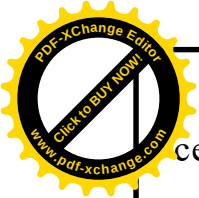
5. Не менш важливими є вимоги малого рівня пульсацій вихідної напруги, а також малого значення постійної часу.

З величезного числа відомих ДШ виділимо основні, що відповідають перерахованим вище вимогам.

1. Датчик ЕРС обертання двигуна для одержання напруги, пропорційної частоті обертання, використовує ЕРС обертання самого двигуна. Найбільш просто це здійснюється в двигунах з нереверсивним живленням секцій. При обертанні постійного магніту ротора в секціях обмотки наводиться знакоперемінна ЕРС, близька за формою до синусоїдальної. Кожна секція підключається транзистором до джерела живлення в ті моменти, коли ЕРС і напруга живлення спрямовані зустрічно.

Головний недолік такого способу обумовлений взаємоіндуктивністю

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
						27
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



секцій, так як напруга перехідних процесів, зв'язаних з відключенням працюючих секцій, трансформується в непрацюючі. Іншим недоліком є те, що частота пульсацій вихідної напруги цілком визначається числом секцій і числом полюсів магніту. Крім того величина вихідної напруги не перевищує величину напруги живлення двигуна, а вихідний сигнал, характеризуючий частоту обертання, гальванічно зв'язаний із джерелом живильної напруги, що приводить до труднощів при побудові схем регуляторів.

2. Датчики з перетворенням частоти імпульсів в аналоговий сигнал застосовуються у тих випадках, коли зручно використовувати вихідні сигнали чуттєвих елементів датчика положення ротора, перетворивши їх в імпульси визначеної тривалості і вимірюючи їхню частоту тим або іншим приладом. Однак при регулюванні частоти обертання скористатися цим методом для одержання сигналу зворотного зв'язку вдається в рідких випадках, оскільки число імпульсів від чуттєвих елементів ДПР за один оберт двигуна, як правило невелике, і перетворення їхньої частоти в аналоговий сигнал не дає необхідної точності.

3. Синхронні тахогенератори зі збудженням від постійних магнітів дозволяють здійснювати контроль частоти обертання по двох параметрах: амплітуді і частоті вихідної напруги.

Якщо частота вихідної напруги однозначно визначається частотою обертання ДПС, то амплітуда залежить ще і від властивостей постійного магніту. Цей спосіб знаходить широке застосування завдяки своїй простоті і високій надійності.

Однак випрямлена напруга залежить від температурної зміни магнітного потоку постійних магнітів, опору обмотки статора, спадання напруги на діодах випрямляча й ін. Крім того, залежність частоти вихідної напруги від частоти обертання індуктора, а так само постійна часу знижує точність і діапазон регулювання, що в ряді випадків обмежує можливість застосування синхронних тахогенераторів.

4. Широке застосування в системах автоматики як інформаційний

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		28



елемент одержали асинхронні тахогенератори (АТГ). Конструктивно складається з зовнішнього і внутрішнього статорів, у зазорі між якими обертається порожній немагнітний ротор. На зовнішньому статорі розташовуються дві обмотки, зрушені в просторі на електричний кут 90° . Одна обмотка підключається до мережі і називається обмоткою збудження, з іншого боку – генераторної знімається вихідна напруга.

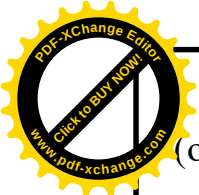
Принцип дії асинхронного ТГ полягає в наступному. Перемінний струм порушення створює пульсуючий потік, що пронизує порожній ротор, наводить у ньому ЕРС трансформації. Виникаючі в роторі струми створюють потік ротора, що спрямований назустріч потокові збудження і компенсується зростаючим струмом обмотки збудження. При обертанні ротор перетинає потік збудження й у ньому наводиться ЕРС обертання. Під дією ЕРС обертання по роторі протікають струми, що створюють потік ротора. Цей потік зчіплюється з витками генераторної обмотки і наводить у ній вихідну ЕРС тахогенератора.

Основними достоїнствами АТГ є лінійна залежність між вихідною напругою і частотою обертання ротора при незмінному зрушенні фаз між напругою збудження, незначний момент інерції ротора, що істотно спрощує побудову системи керування, розширює діапазон регулювання частоти електропривода, підвищує швидкодію [6].

В даний час розвиток напівпровідникової техніки дозволило створити перетворювачі частоти у напругу [12]. Перетворювач частота-напруга (ПЧН) - це пристрій, який перетворює вхідний сигнал змінної частоти (імпульси) на аналоговий сигнал постійної напруги, де величина напруги прямо пропорційна вхідній частоті. Отримане напруга далі зручно використовувати у різних схемах автоматики, зокрема у схемах зворотний зв'язок за швидкістю, що дозволяє замінити електромеханічні тахогенератори.

На підставі проведеного аналізу достоїнств і недоліків існуючих елементів БДПС стосовно до поставленої задачі вибираємо БДПС із трисекційною обмоткою якоря, нереверсивним живленням

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
						29
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



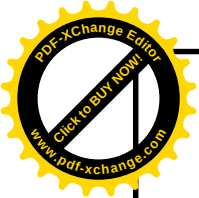
(однонапівперіодна схема комутації) і збудженням від постійного магніту.

датчик положення ротора приймаємо датчик з двома комплектами чутливих елементів Холу для забезпечення реверса і датчик швидкості, виконаний на базі електронного перетворювача частоти в напругу. Систему керування побудуємо на імпульсному способі з застосуванням широтно-імпульсної модуляції. Структурна схема пропонованого БДПС із системою керування представлена на рис.1.3, в.

					141. 4361. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		30



					141. 4361. БР. ПЗ. Р2		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис		Розрахунок безконтактного двигуна постійного струму		
Розроб.	Лисогор П.О.						
Керівник	Александровський С						
Консульт.							
Н. контр.							
В.о.зав. каф.	Обрубов А.В.				ННІАЕ НУК		
					Лім.	Лист	Листів
						31	38



2. РОЗРАХУНОК БЕЗКОНТАКТНОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Для дослідження електромагнітних процесів, що протікають у БДПС доцільно застосувати метод миттєвих значень, що дозволяє детально вивчити процеси в ЕМ і комутаторі на інтервалі комутації й одержати відносно прості співвідношення для проектування БДПС.

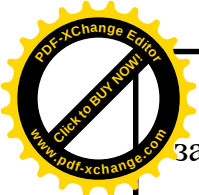
При роботі БДПС його електричні, магнітні і механічні характеристики і параметри міняються в часі. Так, змінює своє значення за час комутації магнітний потік під дією знакоперемінної МРС реакції якоря і періодичної зміни магнітної провідності, викликаного зубцюватою будівлею статора. Через мінливість обертаючого моменту частота обертання теж змінюється, а ЕРС., наведена в секціях ЕМ магнітним потоком, що змінюється, при перемінній частоті обертання, являє собою складну періодичну функцію. Унаслідок явнополюсності ротора за час комутації змінюється індуктивність секцій якірної обмотки. Приймаючи до уваги викладені розуміння, можна описати роботу ЕМ нелінійними рівняннями рівноваги напруг і моментів з перемінними коефіцієнтами.

Рішення такої системи рівнянь у принципі можливо, але його громіздкість і складність ховають сутність фізичних процесів, що протікають у БДПС, значно знижують можливості аналізу результатів. Виходячи з цього доцільно зробити деякі допущення, що дозволяють одержати відносно просте рішення, не знижуючи його точність.

У явнополюсних машинах з постійними магнітами провідності для потоку реакції якоря по подовжній і поперечній осях відрізняються несуттєво, що дозволяє спрощено вважати індуктивність секцій якірної обмотки незмінної на інтервалі комутації.

Можна також зневажити впливом реакції якоря на магнітний потік, оскільки

32					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						32
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



за період комутації реакція якоря спочатку розмагнічує, а потім підмагнічує магніт (зміна магнітного потоку складає приблизно 3...7% при номінальному режимі).

Як показано в [1,3], пульсації частоти обертання в робочому діапазоні мізерно малі. Тому частоту обертання можна вважати постійною.

Думаємо також, що силові транзисторні ключі комутатора мають нескінченно великий вихідний опір у закритому стані.

Якщо опір секцій якірної обмотки носить чисто активний характер, то оптимальною є прямокутна форма противо-ЕРС з кутовим (електричним) розміром $2\pi/m$. Ця форма придатна для реверсивних БДПС і близька до оптимального для реальних якірних обмоток.

2.1. Вихідні дані для розрахунку

Приведена нижче методика описує геометрію якірного пакета, параметри якірного ланцюга, обмотувальні дані, електромагнітні й енергетичні співвідношення, тепловий режим, робочі й механічні характеристики, робочу діаграму постійного магніту, момент інерції й вагу БДПС з урахуванням датчика положення ротора і тахогенератора, а також застосованої схеми комутації. Усі необхідні елементи для проектування попередньо були обрані в розділі 1.

Вихідні дані:

Тип двигуна – трисекційний з одненапівперіодної комутацією $m = 3$.

Номінальна потужність на валу $P_{2н} = 3,0$ Вт.

Номінальна частота обертання $n_n = 750$ об/хв.

Число пар полюсів $p = 3$.

Номінальна напруга живлення $U_n = 24$ В.

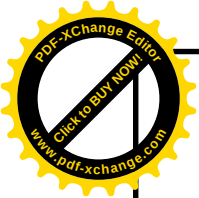
Відхилення напруги від номінального $\Delta U = \pm 2,4$ В.

ККД двигуна $\eta_d = 0,69$.

Число напрямків обертання вала $N_{н.в} = 2$.

Частота обертання, при якій здійснюється реверс $n_p = 0$.

33					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						33
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Температура навколишнього середовища

$$t_{\min} = -60\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{\max} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Термін служби

$$T_{\text{сл}} = 10000\text{ ч.}$$

Керування двигуном із уведенням зворотного зв'язку по швидкості.

Вибираємо:

марку стали якоря

$$\text{Э44,}$$

товщину листа якірного пакета

$$\Delta_{\text{я}} = 0,35 \cdot 10^{-3}\text{ м.}$$

Матеріал індуктора

сплав ЮНДК18,

с залишковою індукцією

$$B_r = 0,9\text{ Тл,}$$

коерцитивної силою

$$H_c = 55\text{ кА/м,}$$

питомою енергією

$$(BH)_{\max} = 19380\text{ Дж/м}^3.$$

2.2. Розрахунок основних параметрів двигуна

2.2.1. Розрахуємо умовний ККД, що враховує потужність усіх втрат у БДПС, крім утрат на керування і переключення в силових транзисторах, що визначає розподіл потужності усіх утрат на потужності втрат у ЕМ і комутаторі. Для регульованих БДПС

$$\eta = (1,05 \dots 1,25) \cdot \eta_{\text{д}} = 1,058 \cdot 0,69 = 0,73. \quad (2.1)$$

2.2.2. Вибираємо незалежні перемінні [1]:

-відношення зовнішнього діаметра пакета якоря $D_{\text{нар}}$ до внутрішнього діаметру D

$$k_D = D_{\text{нар}} / D = (1,7 \dots 2,2) = 1,86;$$

-відношення магнітної індукції в повітряному зазорі B_{δ} до магнітної індукції в сталі $B_{\text{ст}}$

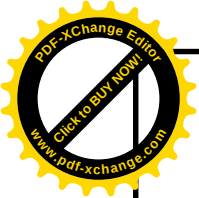
$$k_B = B_{\delta} / B_{\text{ст}} = (0,4 \dots 0,5) = 0,4; \quad (2.2)$$

-відношення довжини пакета якоря L до внутрішнього діаметру D

$$\lambda = L / D = (1,4 \dots 1,8) = 1,45;$$

-відношення ЕРС E до напруги U

34					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						34
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



$$k_e = \frac{E}{U} = \frac{2\eta}{1+\eta} = \frac{2 \cdot 0,73}{1+0,73} = 0,844;$$

-коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha = 2/3$ [1].

2.2.3. Для обраної марки електротехнічної сталі Э44 приймаємо найбільш оптимальне значення магнітної індукції в сталі якоря стосовно до двигунів невеликої потужності

$$B_{ст} = 0,9 \dots 1,2 = 1,0 \text{ Тл.}$$

Магнітну індукцію в спинці B_j і зубцях B_z якоря можна прийняти [1]

$$B_j = B_z = B_{ст} = 1,0 \text{ Тл.}$$

2.2.4. Магнітну індукцію в повітряному зазорі визначимо з формули (2.2)

$$B_{\delta} = k_B \cdot B_{ст} = 0,4 \cdot 1,0 = 0,4 \text{ Тл.}$$

Максимально можлива індукція B_{δ} повинна задовольняти умові [1]

$$k_{B1} = B_{\delta} / B_r \leq 0,75;$$

$$k_{B1} = B_{\delta} / B_r = 0,4 / 0,9 = 0,44 \leq 0,75.$$

2.2.5. Коефіцієнт провідності потоку, що замикається через індуктор визначимо по формулі [1]

$$\Lambda_i = (0,5 \dots 0,7) \frac{\rho}{\mu_0 \cdot p} = 0,645 \cdot \frac{7,3 \cdot 10^{-6}}{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 1,25,$$

де $\mu_0 = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$ Г/м – магнітна постійна;

$\rho = 7,3 \cdot 10^{-6}$ Г/м – коефіцієнт повернення (реверсивна проникність) матеріалу магніту (сплав ЮНДК18). У випадку відсутності даного параметра в довідковій літературі, його можна розрахувати по наближеній формулі, приведеної в [1]. Однак погрішність при цьому може досягати значної величини. Тому пропонується методика визначення реверсивної проникності, заснована на апроксимації характеристики магнітного повернення [8] (див. додаток А).

2.2.6. Вибираємо діаметральну, зосереджену, двошарову, петлеву якірну обмотку з параметрами:

число пазів на полюс, секцію приймаємо $q = 1$;

число пазів $Z = 2 p m q = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 1 = 18$;

крок обмотки по пазах $y = m q = 3 \cdot 1 = 3$.

35					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						35
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Годі коефіцієнт провідності потоку розсіювання лобових частин обмотки

$$\Lambda_{\text{л}} = 0,34 \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot \left(\varepsilon - \frac{2y}{Z} \right) = 0,34 \cdot \frac{1}{1,45} \cdot \left(1,066 - \frac{2 \cdot 3}{18} \right) = 0,172,$$

де $\varepsilon = \frac{k_5 \cdot y}{m \cdot q} \cdot \left(\frac{k_D + 1}{2} - k_2 \frac{B_\delta}{B_j} \right) = \frac{0,79 \cdot 3}{3 \cdot 1} \cdot \left(\frac{1,86 + 1}{2} - 0,2 \cdot \frac{0,4}{1} \right) = 1,066$ – відношення

середньої довжини лобової частини напіввитка до внутрішньому діаметру якоря;

$k_5 = 0,79$ – коефіцієнт, що залежить від полюсності двигуна (табл.1.[1]);

$k_c = 0,93$ – коефіцієнт заповнення пакета сталлю для окисованої ізоляції [1];

$$k_2 = \frac{\pi \cdot \alpha_i}{4 \cdot p \cdot k_c} = \frac{\pi \cdot 0,717}{4 \cdot 3 \cdot 0,93} = 0,2 \text{ – розрахунковий коефіцієнт;}$$

$\alpha_i = (1,04 \dots 1,1) \cdot \alpha = 1,075 \cdot 2/3 = 0,717$ – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття [1].

2.2.7. Коефіцієнт провідності потоку пазового розсіювання попередньо вибирається виходячи з прийнятих значень p, α, k_D, k_B [1]

$$\Lambda_{\text{п}} = 1,605.$$

2.2.8. Сума коефіцієнтів провідностей для всіх магнітних потоків якоря

$$\Sigma \Lambda = \Lambda_i + \Lambda_{\text{л}} + \Lambda_{\text{п}} = 1,25 + 0,172 + 1,605 = 3,03.$$

2.2.9. Коефіцієнт $k_{\beta 3}$ визначимо по формулі

$$k_{\beta 3} = \frac{74q}{\Sigma \Lambda \mu_0} \cdot \sqrt[5]{\frac{(1 - k_e) \cdot \eta}{k_e^2} \left[\frac{(\varepsilon + \lambda)}{k_R k_{3.п.} \cdot (k_{D1} - k_{п.л.})} \right]^3 \frac{(B_\delta \cdot k_\alpha \cdot k_0)^4}{\lambda} \cdot \frac{1}{P_{2н}^2 \cdot n_н}} =$$
$$= \frac{74 \cdot 1}{3,03 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}} \sqrt[5]{\frac{(1 - 0,844) \cdot 0,73}{0,844^2} \left[\frac{(1,066 + 1,45)}{0,98 \cdot 0,32 \cdot (0,615 - 0,294)} \right]^3 \frac{0,4^4}{1,45 \cdot 3^2 \cdot 750}} = 6,2,$$

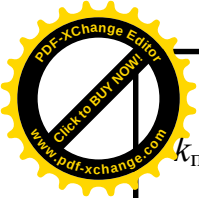
де $k_R = R_c / R = 0,9 \dots 0,99 = 0,98$ – відношення активного опору секції обмотки якоря R_c до активного опору якріного ланцюга R ;

$k_\alpha = 1$ для $\alpha \geq 2/m$ – коефіцієнт, що залежить від коефіцієнта полюсного перекриття α ;

$k_0 \leq 1 = 1$ – обмотувальний коефіцієнт для ЕРС прямокутної форми;

$k_{3.п.} = 0,32$ – коефіцієнт заповнення паза вибирається орієнтовно по додатку 5 [1] у залежності від діаметра проводу;

36					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						36
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



$k_{п.л1} = k_{п.л}$ – коефіцієнт, що визначає співвідношення площі листа якоря і внутрішнього діаметра;

$$k_{п.л1} = k_{п.л} = k_3 k_B - k_4 k_B^2 = 0,838 \cdot 0,4 - 0,258 \cdot 0,4^2 = 0,294;$$

$$k_3 = k_D \cdot (k_1 + k_2) - k_1 = 1,86 \cdot (0,538 + 0,2) - 0,538 = 0,838;$$

$$k_1 = 1 / 2k_c = 1 / 2 \cdot 0,93 = 0,538;$$

$$k_4 = k_2^2 + 2 \cdot k_1 k_2 = 0,2^2 + 2 \cdot 0,538 \cdot 0,2 = 0,258;$$

k_1, k_3, k_4 – розрахункові коефіцієнти;

$k_{D1} = 0,25(k_D^2 - 1) = 0,25(1,86^2 - 1) = 0,615$ – конструктивний коефіцієнт, що визначає залежність між діаметром і площею пазів.

2.2.10. Відношення періоду комутації до електричного постійної часові якірного ланцюга β знайдемо по рис.24 [1] і коефіцієнт k_β визначимо по формулі

$$\beta = 5,7 ; k_\beta = 1 - \frac{(1 - e^{-\beta})}{\beta} = 1 - \frac{(1 - e^{-4,85})}{4,85} = 0,825.$$

2.2.11. Для реверсивних БДПС із метою одержання ідентичних характеристик для правого і лівого напрямків обертання кут випередження включення секцій якірної обмотки встановлюють рівним нулеві (нейтральна комутація) $\theta = 0$. Тоді функції для струмів [1]

$$\phi = \phi_{эм} = (1 - k_e) k_\beta = (1 - 0,844) \cdot 0,825 = 0,129.$$

2.2.12. Розрахуємо внутрішній діаметр якоря для $\lambda = 1,45$

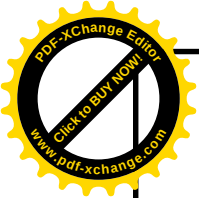
$$D_p = 2,59 \cdot \sqrt{\frac{k_e^2}{\phi} \cdot \frac{P_{2н} \cdot m \cdot \rho_t \cdot (\varepsilon + \lambda)}{(B_\delta \cdot n_n \cdot k_\alpha \cdot k_0)^2 \eta \cdot \lambda^2 \cdot k_R k_{з.п.} \cdot (k_{D1} - k_{п.л.})}} =$$
$$= 2,59 \times \sqrt{\frac{0,844^2}{0,129} \cdot \frac{3 \cdot 3 \cdot 2,174 \cdot 10^{-8} \cdot (1,066 + 1,45)}{(0,4 \cdot 750)^2 \cdot 0,73 \cdot 1,45^2 \cdot 0,32 \cdot 0,98(0,615 - 0,294)}} = 0,0296 \text{ м},$$

де $\rho_t = 10^{-6}/46 = 2,174 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – питомий опір міді при робочій температурі, прийнятої рівної $t = 75^\circ$.

Відповідно до додатка 1 [1] приймаємо з кращих рядів $Ra20$ і $Ra40$

$$D = 28 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

37					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						37
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



2.2.13. Тоді довжину пакета якоря визначимо з умови збереження площі внутрішньої поверхні якоря при зміні діаметра

$$L = \frac{\lambda \cdot D_p^2}{D} = \frac{1,45 \cdot (29,6 \cdot 10^{-3})^2}{28 \cdot 10^{-3}} = 45,45 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Приймаємо $L = 42 \cdot 10^{-3}$ м. Перерахуємо

$$\lambda = \frac{L}{D} = \frac{42 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} = 1,5.$$

2.2.14. Перевіримо можливість користування однонапівперіодної комутації по умові [1]

$$\left[\frac{k_e^2}{(1 - k_e) \cdot \eta} \right]^2 P_{2H}^2 \cdot n_H \leq 6020 \cdot \frac{k_\beta^2}{\beta^5} \left(\frac{q}{\Sigma \Lambda \mu_0} \right)^5 \frac{(k_\alpha k_0 B_\delta)^4}{m^2 \lambda} \left[\frac{\rho_t (\varepsilon + \lambda)}{k_R k_{3.П.} \cdot (k_{D1} - k_{П.Л.})} \right]^2;$$

$$\left[\frac{0,844^2}{(1 - 0,844) \cdot 0,73} \right]^2 3^2 \cdot 750 = 2,638 \cdot 10^5;$$

$$6020 \frac{0,825^2}{5,7^5} \left(\frac{1}{3,026 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}} \right)^5 \frac{0,4^4}{3^2 \cdot 1,5} \left[\frac{2,174 \cdot 10^{-8} (1,066 + 1,5)}{0,32 \cdot 0,98 (0,615 - 0,294)} \right]^2 = 2,7 \cdot 10^5;$$

$$2,7 \cdot 10^5 > 2,638 \cdot 10^5,$$

тобто, умова виконується.

2.2.15. Втрати в сталі визначимо по формулі для $B_z = B_j$ і обраних коефіцієнтів (п.2.2.2.)

$$P_{ст} = \xi \cdot B_j^2 \cdot k_{П.Л1} \cdot \lambda \cdot D^3 = 4,14 \cdot 10^4 \cdot 1^2 \cdot 0,294 \cdot 1,5 \cdot (28 \cdot 10^{-3})^3 = 0,4 \text{ Вт.}$$

Тут

$$\xi = 0,55 \cdot 10^5 \cdot k_c \cdot p_{\Pi} \cdot \left(\frac{p \cdot n_H}{60 \cdot f_{\Pi}} \right)^{4/3} =$$

$$= 0,55 \cdot 10^5 \cdot 0,93 \cdot 19 \cdot \left(\frac{3 \cdot 750}{60 \cdot 400} \right)^{4/3} = 4,14 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{Тл}^2),$$

де $p_{\Pi} = 19$ Вт/кг – питомі втрати на перемагнічування при

$f_{\Pi} = 400$ Гц – частоті перемагнічування по додатку 3 [1].

2.2.16. Потужність утрат на тертя в підшипниках

$$P_{тр.П} = \chi \cdot \lambda \cdot D^3 = 1,617 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot (28 \cdot 10^{-3})^3 = 0,053 \text{ Вт,}$$

38					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						38
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



де $\chi = (200 \dots 300) \cdot D_{\text{ш}} \cdot n_{\text{н}} = 220 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} \cdot 750 = 1,617 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^3$ – питомі Вт на тертя;

$D_{\text{ш}} = (0,25 \dots 0,5)D = 0,35 \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – діаметр окружності, на якій знаходяться центри кульок підшипників.

2.2.17. Потужність утрат на тертя ротора об повітря

$$P_{\text{тр.в}} = \nu \cdot \lambda \cdot D^4 = 928,1 \cdot 1,5 \cdot (28 \cdot 10^{-3})^4 = 8,56 \cdot 10^{-4} \text{ Вт},$$

де $\nu = (2,1 \dots 2,5)n_{\text{н}}^3 \cdot 10^{-6} = 2,2 \cdot 750^3 \cdot 10^{-6} = 928,1 \text{ Вт/м}^5$ коефіцієнт втрат на тертя ротора об повітря.

2.2.18. Потужність додаткових втрат

$$P_{\text{д}} = k_{\text{д}} \cdot \frac{P_{2\text{н}}}{\eta} = 0,03 \cdot \frac{3}{0,73} = 0,123 \text{ Вт},$$

де $k_{\text{д}} = 0,02 \div 0,03 = 0,03$ – коефіцієнт додаткових втрат.

2.2.19. Сумарна потужність втрат

$$P_{\text{с.м.д}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{тр.п}} + P_{\text{тр.в}} + P_{\text{д}} = 0,4 + 0,053 + 8,56 \cdot 10^{-4} + 0,123 = 0,578 \text{ Вт}.$$

2.2.20. Обчислимо умовний ККД, що враховує потужність усіх втрат, крім потужності втрат у комутаторі

$$\eta = \frac{P_{2\text{н}} \cdot k_e}{P_{2\text{н}} + P_{\text{с.м.д}}} \cdot \frac{\phi_{\text{эм}}}{\phi} = \frac{3 \cdot 0,844}{3 + 0,578} \cdot 1 = 0,708.$$

Розбіжність між отриманим значенням умовного ККД і значенням, знайденим попередньо у п. 2.2.1. складає

$$\frac{0,73 - 0,708}{0,73} \cdot 100 = 3 \%,$$

що є задовільним результатом.

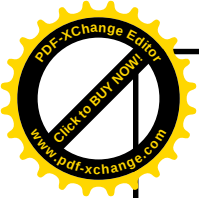
2.2.21. Визначимо число витків в пазу секцій якірної обмотки

$$\begin{aligned} u_{\text{п}} &= \frac{9,55 \cdot k_e \cdot U_{\text{н}} \cdot m}{q \cdot p \cdot k_{\alpha} \cdot k_0 \cdot n_{\text{н}} \cdot B_{\delta} \cdot \lambda \cdot D^2 \cdot m_1} = \\ &= \frac{9,55 \cdot 0,844 \cdot 24 \cdot 3}{1 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 750 \cdot 0,4 \cdot 1,5 \cdot (28 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3} = 182,7. \end{aligned}$$

Округляємо до цілого, парного числа, тому що обмотка двошарова.

$$u_{\text{п}} = 182.$$

39					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						39
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



2.2.22. Загальне число витків секцій якірної обмотки

$$w = \frac{q \cdot p \cdot u_{\pi} \cdot m}{m_1} = \frac{1 \cdot 3 \cdot 182 \cdot 3}{3} = 546.$$

Схема обмотки представлена на рис.2.1.

2.2.23. Середня довжина лобової частини напіввитка, що проходить через центр паза

$$l_{\pi} = \varepsilon \cdot D = 1,066 \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 29,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2.2.24. Виліт лобової частини обмотки на одну сторону

$$l_{\text{в}} = 0,5 \cdot k_6 \cdot \varepsilon \cdot D = 0,5 \cdot 0,55 \cdot 1,066 \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

де $k_6 = 0,55$ – коефіцієнт, що залежить від полюсності двигуна по табл.1.[1].

2.2.25. Розрахуємо активний опір якірного ланцюга

$$R = \phi \cdot \eta \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{2\text{н}}} = 0,129 \cdot 0,73 \cdot \frac{24^2}{3} = 18,05 \text{ Ом.}$$

2.2.26. Індуктивність секції якірної обмотки знайдемо з вираження

$$L_s = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot w^2 \cdot L}{p \cdot q} \cdot \Sigma \Lambda = \frac{2 \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-6} \cdot 546^2 \cdot 42 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 1} \cdot 3,026 = 31,73 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

2.2.27. Площа поперечного переріза одного напіввитка (по міді)

$$\begin{aligned} Q_c &= 2\rho_t \cdot \frac{w}{k_R \cdot R} \cdot (\lambda + \varepsilon) \cdot D = \\ &= 2 \cdot \frac{10^{-6}}{46} \cdot \frac{546}{0,98 \cdot 18,07} \cdot (1,5 + 1,066) \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 9,64 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2, \end{aligned}$$

По табл.П-28 5 [9] вибираємо провід марки ПЭТВ

$Q_c = 9,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ – площа поперечного переріза;

$d_r = 0,355 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – діаметр неізолюваного проводу;

$d_{\text{із}} = 0,395 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – діаметр обмотувального проводу з ізоляцією.

2.2.28. Визначимо величину повітряного зазору

$$\delta = [0,1 + (3 \dots 5)D] \cdot 10^{-3} = (0,1 + 3 \cdot 28 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-3} = 0,19 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

що відповідає рекомендованим значенням для машин малої потужності $(0,1 \dots 0,35) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ [1].

40					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						40
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

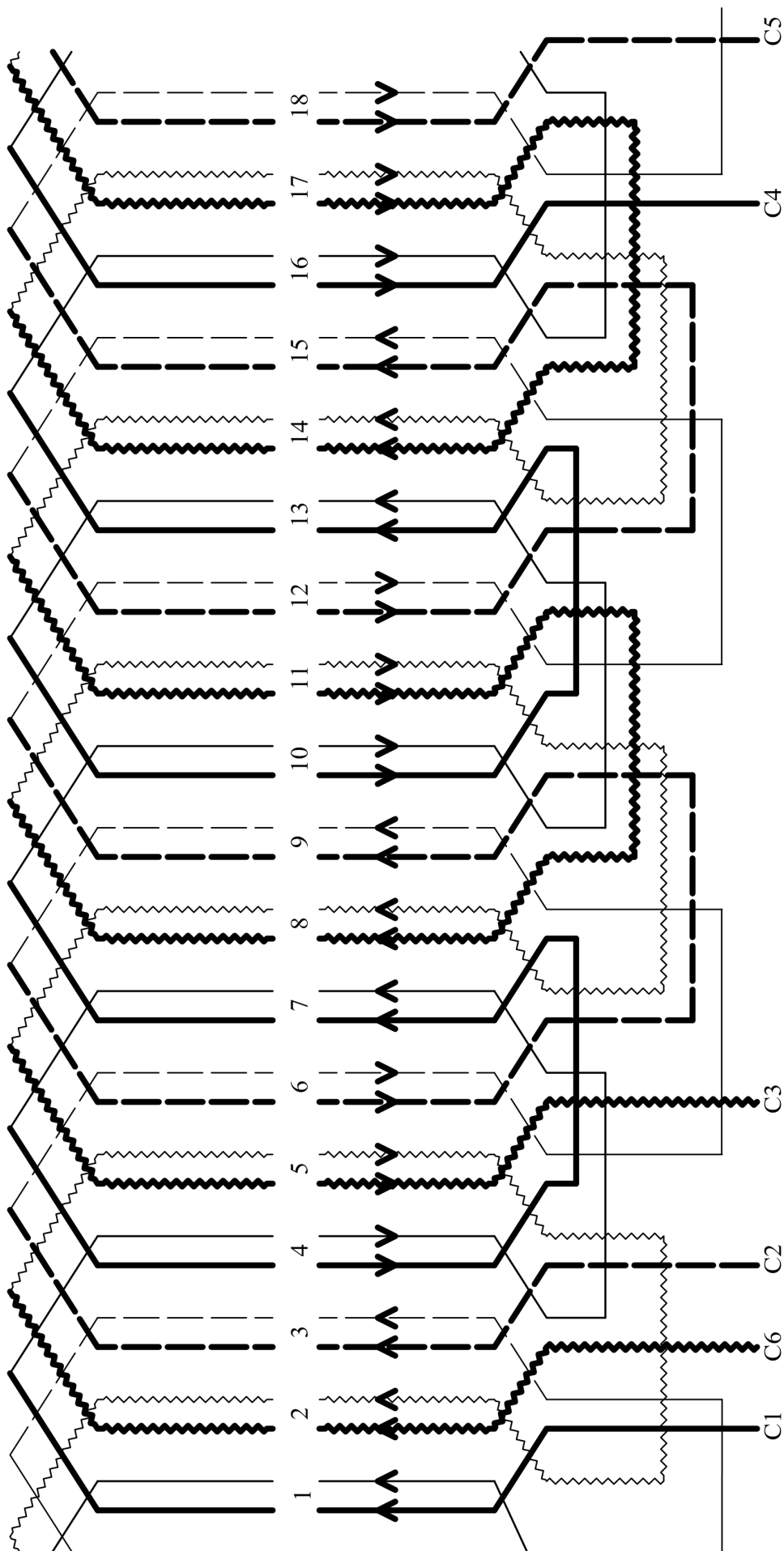


Рис.2.1. Обмотка якоря БДПС
($Z=18$; $q=1$; $2p=6$; $y=3$).

2.2.29. Висота $h_{\text{ш}}$ і ширина $b_{\text{ш}}$ щілини обраного паза (рис.2.2)

$$h_{\text{ш}} = (0,35 \dots 0,7) \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_{\text{ш}} = d_{\text{із}} + (0,5 \dots 1,0) \cdot 10^{-3} = 0,395 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

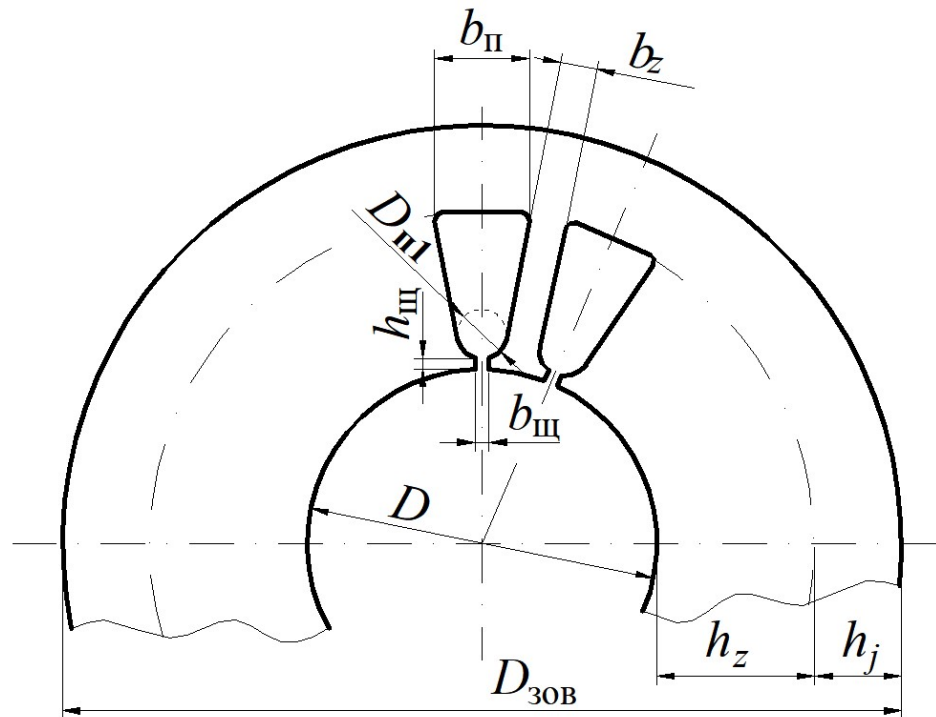


Рис.2.2. Лист заліза якоря

2.2.30. Обчислюємо коефіцієнт повітряного зазору

$$k_{\delta} = \left[1 - \frac{Z \cdot b_{\text{ш}}}{\pi \cdot D \cdot \left(1 + 5 \frac{\delta}{b_{\text{ш}}} \right)} \right] = \left[1 - \frac{18 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 28 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + 5 \cdot \frac{0,19 \cdot 10^{-3}}{1,4 \cdot 10^{-3}} \right)} \right] = 1,21.$$

2.2.31. Питома провідність для корисного потоку магніту

$$g = \frac{\mu_0 \cdot k_{\text{м.л}} \cdot D}{2 \cdot k_{\delta} \cdot k_{\text{м.ц}} \cdot \delta} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 0,51 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,21 \cdot 1,05 \cdot 0,19 \cdot 10^{-3}} = 3,751 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/м},$$

де $k_{\text{м.л}} = 0,51$ – коефіцієнт пропорційності між діаметром D і довжиною середньої магнітної лінії $l_{\text{м.л}}$ постійного магніту на пари полюсів табл.2 [1];

$k_{\text{м.ц}} = 1,03 \dots 1,12 = 1,05$ – коефіцієнт магнітного ланцюга [1].

2.2.32. Обчислюємо струм якоря, що відповідає максимальному розмагнічуванню магніту

$$I_{\text{разм}} = I_{\text{max}} = \frac{k_{\text{рев}} U_{\text{max}}}{k_{t, \text{min}} \cdot R} = \frac{k_{\text{рев}} (U_{\text{н}} + \Delta U)}{k_{t, \text{min}} \cdot R} = \frac{1 \cdot (24 + 2,4)}{0,487 \cdot 18,04} = 3 \text{ А},$$

де $k_{\text{рев}}=1$, оскільки $n_{\text{рев}}=0$ – коефіцієнт, що характеризує відношення струму реверса до пускового струму;

$k_{t, \text{min}} = 1 + 0,0038 \cdot (t_{\text{min}} - 75) = 1 + 0,0038 \cdot (-60 - 75) = 0,487$ – температурний коефіцієнт опору для мінімальної температури;

2.2.33. Знайдемо максимально можливу напруженість магнітного поля, створюваного подовжньою реакцією якоря, для чого спочатку розрахуємо коефіцієнт

$$k_{H \text{ max}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{m} + \theta\right) k_0}{p \cdot k_{\text{м.л}}} \cdot \frac{w}{D} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} + 0\right) \cdot 1}{2 \cdot 0,51} \cdot \frac{546}{28 \cdot 10^{-3}} = 11040 \approx 11050 \text{ м}^{-1};$$

$$H_{\text{я.д max}} = k_{H \text{ max}} \cdot I_{\text{разм}} = 11050 \cdot 3 = 33150 \text{ А/м}.$$

2.2.34. Оцінюємо стійкість магніту до розмагнічування для двох випадків стабілізації магніту: а) при стабілізації магніту якірним струмом; б) при стабілізації магніту в вільному стані. У додатку Б приведені розрахункові формули і графіки залежностей $H_{\text{ст}} = f(g)$, $B_{\delta \text{ св}} = f(g)$, по яких при відомих $g, H_{\text{я.д max}}, g_{\text{с.св}}, B_{\delta}$ можна знайти значення індукції в повітряному зазорі. Однак більш точно можна визначити B_{δ} аналітичним способом. Питомі провідності розсіювання магніту, що знаходиться в якорі g_s та в вільному стані $g_{\text{с.св}}$ знаходимо по табл.2 [1] ($g_s = 1,9 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $g_{\text{с.св}} = 3,0 \cdot 10^{-6}$ Гн/м).

а) при стабілізації магніту якірним струмом

$$B_{\delta \text{ я}} = \frac{g}{g_0} \left(B_1 - \sqrt{B_1^2 - B_2} \right) = \frac{3,73 \cdot 10^{-5}}{3,92 \cdot 10^{-5}} \left(1,955 - \sqrt{1,955^2 - 2,01} \right) = 0,58 \text{ Тл},$$

де

$$B_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{B_r + g_0 H_c}{a_b} - \frac{g(g_0 + \rho)}{g_0 - \rho} H_{\text{яд max}} \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{0,9 + 4,92 \cdot 10^{-5} \cdot 55 \cdot 10^3}{0,642} \right) -$$

$$- \frac{1}{2} \cdot \frac{3,73 \cdot 10^{-5} (3,92 \cdot 10^{-5} + 7,3 \cdot 10^{-6})}{3,92 \cdot 10^{-5} - 7,3 \cdot 10^{-6}} \cdot 33,19 \cdot 10^3 = 1,955 \text{ Тл},$$

$$B_2 = g_0 \left[\frac{B_r H_c}{a_B} - \frac{g(B_r - \rho H_c)}{a_B(g_0 + \rho)} H_{ад \max} - \frac{g^2 \rho}{(g_0 + \rho)^2} H_{ад \max}^2 \right] = 3,941 \cdot 10^{-5} \times$$

$$\times \left[\frac{0,9 \cdot 55 \cdot 10^3}{0,642} - \frac{3,73 \cdot 10^{-5} \cdot 33,19 \cdot 10^3}{0,642} \cdot \frac{0,9 - 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot 55 \cdot 10^3}{3,92 \cdot 10^{-5} + 7,3 \cdot 10^{-6}} - \right.$$

$$\left. - \frac{(3,73 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-6}}{(3,92 \cdot 10^{-5} + 7,3 \cdot 10^{-6})^2} (33,19 \cdot 10^3)^2 \right] = 2,01 \text{ Тл},$$

$$a_B = 2 \sqrt{\frac{B_r H_c}{(BH)_{\max}}} - \frac{B_r H_c}{(BH)_{\max}} = 2 \sqrt{\frac{0,9 \cdot 55 \cdot 10^3}{19,38 \cdot 10^3}} - \frac{0,9 \cdot 55 \cdot 10^3}{19,38 \cdot 10^3} = 0,642 -$$

– коефіцієнт опуклості кривої розмагнічування;

$g_0 = g_s + g = 1,9 \cdot 10^{-6} + 37,3 \cdot 10^{-6} = 39,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ – питома провідність для повного потоку, що проходить через нейтральний перетин магніту.

б) при стабілізації магніту в вільному стані

$$B_{\delta \text{св}} = \frac{g}{g_0} (B_3 - \sqrt{B_3^2 - B_4}) = \frac{3,751 \cdot 10^{-5}}{3,941 \cdot 10^{-5}} (2,4 - \sqrt{2,4^2 - 1,94}) = 0,423 \text{ Тл},$$

де

$$B_3 = \frac{B_r + g_{\text{св}} H_c}{2a_B} \cdot \frac{1 + \frac{\rho}{g_{\text{св}}}}{1 + \frac{\rho}{g_0}} = \frac{0,9 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot 55 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,642} \cdot \frac{1 + \frac{7,3 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}}}{1 + \frac{7,3 \cdot 10^{-6}}{3,92 \cdot 10^{-5}}} = 2,4 \text{ Тл},$$

$$B_4 = \frac{B_r H_c}{a_B} \cdot g_{\text{св}} \cdot \frac{1 + \frac{\rho}{g_{\text{св}}}}{1 + \frac{\rho}{g_0}} = \frac{0,9 \cdot 55 \cdot 10^3}{0,642} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1 + \frac{7,3 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}}}{1 + \frac{7,3 \cdot 10^{-6}}{3,92 \cdot 10^{-5}}} = 1,94 \text{ Тл}.$$

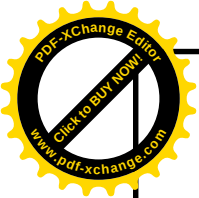
У результаті одержали $B_{\delta \text{св}} = f(g) \geq B_{\delta}$, $B_{\delta \text{я}} = f(H_{\text{я.д max}}, g) \geq B_{\delta}$.

Запас стійкості складає

$$\frac{0,58 - 0,4}{0,4} \cdot 100\% = 44,8\%; \quad \frac{0,423 - 0,4}{0,4} \cdot 100\% = 5,8\%.$$

2.2.35. Для обраної схеми комутатора як транзисторні ключі вибираємо польові транзистори, сполучені с захисними діодами для чого обчислимо максимальну напругу на переході стік - витік

44					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		44



$$U_{\text{св. max}} = U_{\text{н}} + \Delta U = 24 + 2,4 = 26,4 \text{ В};$$

$$I_{\text{max}} = 3 \text{ А.}$$

Як силові транзистори вибираємо по напрузі $U_{\text{св. max}}$ і струму I_{max} польовий транзистор типу BSS295 [12] (аналог СНД - транзистор КП505В). Параметри транзистора представлені в табл.2.1.

2.2.36. У нашому випадку додатковий опір в якірному ланцюзі відсутнє $R_{\text{д}} = 0$. А умовний середній споживаний струм дорівнює

$$I = \frac{P_{2\text{н}}}{U_{\text{н}} \cdot \eta} = \frac{3}{24 \cdot 0,73} = 0,17 \text{ А.}$$

Таблиця 2.1. Параметри транзистора BSS295

№	Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1.	Напруга стік - витік	$U_{\text{св. доп}}$	В	50
2.	Струм стоку	$I_{\text{н}} / I_{\text{ст. доп}}$	А	1,4/5,6
3.	Вхідна ємність	$C_{\text{вх}}$	пФ	320
4.	Напруга управління (затвор – витік)	U_{y}	В	10
5.	Опір відкритого каналу	R_{DS}	Ом	0,3
6.	Час включення (<i>rise</i>)	t_{r}	нс	20
7.	Час відключення (<i>fall</i>)	t_{f}	нс	85

2.2.37. Активний опір якірної обмотки

$$R_{\text{с}} = R - R_{\text{DS}} - R_{\text{д}} = 18,07 - 0,3 - 0 = 17,75 \text{ Ом.}$$

2.2.38. Уточнюємо перетин по міді одного напіввитка

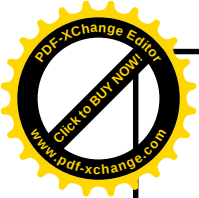
$$Q_{\text{с}} = 2\rho_{\text{т}} \cdot \frac{w}{k_{\text{R}} \cdot R_{\text{с}}} \cdot (\lambda + \varepsilon) \cdot D = 2 \cdot \frac{10^{-6}}{46} \cdot \frac{546}{0,98 \cdot 17,75} \cdot (1,5 + 1,066) \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 9,61 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2,$$

або з обліком п.2.2.23.

$$Q'_{\text{с}} = Q_{\text{с}} \cdot \frac{k_{\text{R}} \cdot R}{R_{\text{с}}} = 9,61 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,98 \cdot 18,05}{17,75} = 9,578 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2.$$

По табл.П-28 5 [8] вибираємо

45					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						45
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



$$Q_c = 0,99 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2; d_r = 0,355 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d_{i3} = 0,395 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$
$$k_{3,п} = 0,29 \dots 0,37.$$

Уточнюємо $k_{3,п} = 0,32$.

2.2.39. Уточнюємо значення опорів R_c , R і коефіцієнта k_R

$$R_c = R_c \cdot \frac{Q'_c}{Q_c} = 17,75 \cdot \frac{0,958 \cdot 10^{-7}}{0,99 \cdot 10^{-7}} = 17,17 \text{ Ом};$$

$$R = R_c + R_{DS} + R_d = 17,17 + 0,3 + 0 = 17,47 \text{ Ом};$$

$$k_R = \frac{R_c}{R} = \frac{17,47}{18,05} = 0,983.$$

Відхилення від прийнятого значення k_R складає

$$\frac{0,983 - 0,98}{0,98} \cdot 100 = 0,31 \text{ \%}.$$

2.2.40. Уточнюємо коефіцієнти β , k_β , $k_{\beta 1}$, $k_{\beta 2}$, функції ϕ , $\phi_{эм}$

$$\beta = \frac{38,2 \cdot q \cdot \rho_t (\varepsilon + \lambda)}{\mu_0 \cdot \lambda \cdot D^2 \cdot n_H \cdot \Sigma \Lambda \cdot k_R k_{3,п} \cdot (k_{D1} - k_{п.л.})} =$$
$$= \frac{38,2 \cdot 1 \cdot 2,174 \cdot 10^{-8} (1,066 + 1,5)}{0,4\pi \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 (28 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 750 \cdot 3,026 \cdot 0,32 \cdot 0,98 (0,615 - 0,294)} = 6,295.$$

Знаходимо

$$k_\beta = 1 - \frac{(1 - e^{-\beta})}{\beta} = 1 - \frac{(1 - e^{-6,295})}{6,295} = 0,841;$$

$$k_{\beta 1} = \frac{(1 - e^{-\beta})}{k_\beta} = \frac{(1 - e^{-6,295})}{0,841} = 1,186;$$

$$k_{\beta 2} = \frac{2\beta - 3 + 4e^{-\beta} - e^{-2\beta}}{2\beta \cdot k_\beta^2} = \frac{(2 \cdot 6,295 - 3 + 4e^{-6,295} - e^{-2 \cdot 6,295})}{2 \cdot 6,295 \cdot 0,841^2} = 1,077;$$

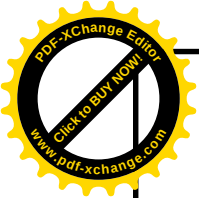
$$\phi = \phi_{эм} = (1 - k_e) \cdot k_\beta = (1 - 0,844) \cdot 0,841 = 0,131.$$

2.2.41. Обчислюємо умовний струм I і перевіряємо корисну потужність двигуна $P_{2н}$

$$I = I_{эм} = \frac{U}{R} \cdot \phi = \frac{24}{17,47} \cdot 0,131 = 0,18 \text{ А};$$

$$P_2 = k_e \cdot U_H \cdot I_{эм} - P_{с.м.д} = 0,844 \cdot 24 \cdot 0,18 - 0,578 = 3,076 \text{ Вт}.$$

46					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						46
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Розбіжність між отриманим і заданим результатом складає

$$\frac{|3 - 3,076|}{3} \cdot 100 \% = 2,5 \%,$$

що є задовільним результатом.

2.2.42. Обчислюємо потужність втрат у силових транзисторах у відкритому стані P_{DS} на переключення $P_{пер}$ і керування P_y силовими транзисторами [13]

$$P_{DS} = k_{\beta 2} \cdot I^2 \cdot R_{DS} = 1,077 \cdot 0,18^2 \cdot 0,3 = 0,011 \text{ Вт.}$$

$$P_{пер} = 0,5 \cdot U_{відкл} \cdot I_{відкл} \cdot \frac{T_{пер}}{T_y} = 0,5 \cdot 26,4 \cdot 0,214 \cdot \frac{105 \cdot 10^{-9}}{8 \cdot 10^{-4}} = 3,71 \cdot 10^{-4} \text{ Вт,}$$

де $U_{відкл} = U_{св.мах} = 26,4 \text{ В}$ – напруга на переході стік – витік силового транзистора при відключенні;

$I_{відкл} = I \cdot k_{\beta 1} = 0,18 \cdot 1,186 = 0,214 \text{ А}$ – струм відключення силових транзисторів;

$T_{пер} = t_r + t_f = (20 + 85) \cdot 10^{-9} = 105 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ – час відключення і відключення силовими транзисторами секції обмотки;

$T_y = 0,1 T = 0,1 \cdot 8,89 \cdot 10^{-3} \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ – період генерування сигналів управління;

$T = 60 / (p \cdot m \cdot n_n) = 60 / (3 \cdot 3 \cdot 750) = 8,89 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ – період дійсної комутації секції якорної обмотки;

$$P_y = \frac{U_y^2 \cdot C_{вх}}{T_y} = \frac{10^2 \cdot 320 \cdot 10^{-12}}{8 \cdot 10^{-4}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт,}$$

де $U_y = 10 \text{ В}$ – напруга управління (стік – затвор).

2.2.43. Уточнюємо ККД двигуна

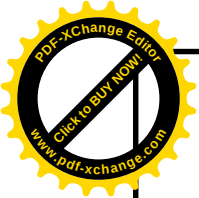
$$\eta_d = \frac{P_2}{UI + P_{пер} + P_y + P_{DS}} = \frac{2,9}{24 \cdot 0,172 + 3,71 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-5} + 0,011} = 0,709.$$

$$\frac{|0,69 - 0,709|}{0,69} \cdot 100 = 2,8 \%.$$

Розбіжність із заданим значенням складає менш 10%.

2.2.44. Визначаємо припустиму температуру ізоляції обмотки

47					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						47
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



$$t_{\text{доп}} = t_{\text{дл}} + 30 \log \frac{140000}{T_{\text{сл}}} = 105 + 30 \log \frac{140000}{10000} = 139,4^{\circ}\text{C},$$

де $t_{\text{дл}} = 105^{\circ}\text{C}$ – температура, що відповідає тривалому термінові служби ізоляції класу нагрівостійкості A (140000 годин ≈ 15 років).

2.2.45. Потужність втрат у якірній обмотці знайдемо з вираження

$$P_{\text{я}} = k_{\beta 2} \cdot I^2 \cdot R_{\text{с}} = 1,08 \cdot 0,18^2 \cdot 17,17 = 0,6 \text{ Вт.}$$

2.2.46. Визначимо діаметр $D_{\text{к}}$, довжину $L_{\text{к}}$ корпуса двигуна і площу зовнішньої поверхні корпуса $Q_{\text{к}}$ усієї машини,

$$D_{\text{к}} = k_D \cdot D + 2 \cdot \Delta_{\text{к}} = 1,86 \cdot 28 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$L_{\text{к}} = L + 2l_{\text{выл}} + L_{\text{дпр}} + \Delta = (\lambda + \varepsilon \cdot k_6) \cdot D + l + L_{\text{дпр}} + \Delta = \\ = (1,5 + 1,066 \cdot 0,55) \cdot 28 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3} + 11,5 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3} = 83 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$Q_{\text{к}} = \pi \cdot D_{\text{к}} \cdot (L_{\text{к}} + 0,5 D_{\text{к}1}) = \\ = \pi \cdot [60 \cdot 10^{-3} (83 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 60 \cdot 10^{-3})] = 21 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

де $L_{\text{дпр}} = 11,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; – довжини датчика положення ротора;

$l = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – довжина, що враховує товщину корпуса з підшипниками;

$\Delta_{\text{к}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – товщина корпуса машини;

$\Delta = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – сумарне значення повітряних зазорів між елементами двигуна і корпусу.

2.2.47. Оцінюємо тепловий режим по максимальній температурі якірної обмотки

$$t_{\text{обм.мах}} = t_{\text{мах}} + (1,05 \div 1,12) \frac{P_{\text{я}} + P_{\text{с.м.д}}}{Q_{\text{к}} \cdot k_{\text{т.к}}} = 60 + 1,07 \frac{0,6 + 0,578}{21 \cdot 10^{-3} \cdot 14} = 64,2^{\circ}\text{C},$$

де $k_{\text{т.к}} = 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні корпуса.

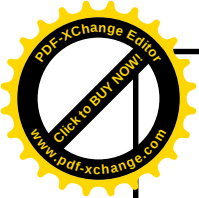
$$t_{\text{обм.мах}} < t_{\text{дл}},$$

отже, тепловий режим БДПС можна вважати задовільним.

2.2.48. Розраховуємо пускові струми при двох можливих режимах роботи БДПС

$$I_{\text{п1}} = I_{\text{мах}} = \frac{U_{\text{н}} + \Delta U}{k_{\text{т.мін}} \cdot R} = \frac{24 + 2,4}{0,487 \cdot 17,47} = 3,1 \text{ А};$$

48					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
						48
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



$$I_{п2} = I_{\max} = \frac{U_{\text{н}} - \Delta U}{R} = \frac{24 - 2,4}{17,47} = 1,24 \text{ А.}$$

2.2.49. Умовний струм дорівнює

$$I_0 = \frac{(g_0 + \rho) \cdot B_{\delta}}{g \cdot (g_s + \rho) \cdot k_{H \max}} = \frac{(39,41 + 7,3) \cdot 10^{-6} \cdot 0,4}{37,51 \cdot 10^{-6} \cdot (1,9 + 7,3) \cdot 10^{-6} \cdot 11050} = 4,9 \text{ А.}$$

Оскільки $I_{п1} > 0,5I_0$, а $I_{п2} < 0,5I_0$, те розраховуємо і порівнюємо

$$I_{п1} \cdot \left(1 - \frac{I_{п1}}{I_0}\right) = 3,1 \cdot \left(1 - \frac{3,1}{4,9}\right) = 1,14 \text{ А;}$$

$$I_{п2} \cdot \left(1 - \frac{I_{п2}}{I_0}\right) = 1,24 \cdot \left(1 - \frac{1,24}{4,9}\right) = 0,925 \text{ А} < 1,14 \text{ А.}$$

2.2.50. Перевіримо мінімальну кратність пускового моменту

$$k_M = k_{\theta} \cdot \frac{k_e \cdot U_{\text{н}}}{P_{2\text{н}}} \cdot I_{п2} \cdot \left(1 - \frac{I_{п2}}{I_0}\right) - k_{\text{тр}} = 1 \cdot \frac{0,844 \cdot 24}{3} \cdot 0,925 - 0,3 = 5,94 > 2,5,$$

де $k_{\text{тр}} = 0,1 \dots 0,3 = 0,3$ – коефіцієнт, що враховує момент тертя в підшипниках і реактивний момент при пуску;

$k_{\theta} = 1$ – при $\theta = 0$ і $\alpha = 2/m$.

2.2.51. Визначимо висоту і ширину зубця (рис.2.2)

$$h_z = \left(\frac{k_D - 1}{2} - k_2 \cdot \frac{B_{\delta}}{B_j} \right) \cdot D = \left(\frac{1,86 - 1}{2} - 0,2 \cdot \frac{0,4}{1} \right) \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$b_z = \frac{2\pi}{Z} \cdot k_1 \cdot \frac{B_{\delta}}{B_z} \cdot D = \frac{2\pi}{18} \cdot 0,538 \cdot \frac{0,4}{1} \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

де $k_2 = \frac{\pi \alpha_i}{4 p k_c} = \frac{\pi \cdot 0,709}{4 \cdot 3 \cdot 0,93} = 0,2$ – розрахунковий коефіцієнт;

$$\alpha_i = \alpha + \frac{4}{\frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot \delta} + \frac{6}{1 - \alpha}} = \frac{2}{3} + \frac{4}{\frac{\pi \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3 \cdot 0,19 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1 - 2/3}} = 0,709 \text{ – розрахунковий}$$

коефіцієнт полюсного перекриття.

2.2.52. Розрахуємо велику ширину паза

$$b_{\Pi} = \frac{\pi \cdot (D + 2h_z) - b_z \cdot Z}{Z} = \frac{\pi \cdot (0,028 + 2 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3}) - 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 18}{18} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2.2.53. Довжину середньої магнітної лінії спинки якоря на один паз розрахуємо по формулі (попередньо)

$$l_j = \frac{\pi}{4p} \cdot \left(k_D - k_2 \cdot \frac{B_\delta}{B_j} \right) \cdot D = \frac{\pi}{4 \cdot 3} \cdot \left(1,86 - 0,2 \cdot \frac{0,4}{1} \right) \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 13,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2.2.54. Висоту спинки якоря визначимо з вираження

$$h_j = k_2 \cdot \frac{B_\delta}{B_j} \cdot D = 0,2 \cdot \frac{0,4}{1} \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

З технологічних розумінь повинне виконуватися умова $h_j \geq 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $b_z \geq 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Отримані значення h_j , b_z задовольняють цим умовам.

2.2.55. Далі визначимо зовнішній діаметр якоря

$$D_{\text{зов}} = k_D \cdot D = 1,86 \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 52 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2.2.56. Знайдемо діаметр окружності, що округляє паз з боку щілини

$$D_{\text{н1}} = \frac{1 - 2k_1 \cdot \frac{B_\delta}{B_z} + 2 \cdot \frac{h_{\text{щ}}}{D}}{\frac{Z}{\pi} - 1} \cdot D = \frac{1 - 2 \cdot 0,538 \cdot \frac{0,4}{1} + 2 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}}}{\frac{18}{\pi} - 1} \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2.2.57. Уточнюємо значення коефіцієнта магнітного ланцюга і магнітної провідності

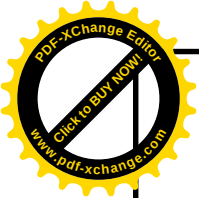
$$\begin{aligned} k'_{\text{м.ц}} &= 1 + \frac{H_z \cdot h_z + k_j \cdot H_j \cdot l_j}{B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \mu_0 = \\ &= 1 + \frac{170 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} + 0,57 \cdot 170 \cdot 13,1 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2} \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} = 1,04, \end{aligned}$$

де $H_z = 170 \text{ А/м}$ - напруженість магнітного поля в зубцях, що відповідає магнітної індукції B_z (додаток 4 [1]);

$H_j = 170 \text{ А/м}$ - напруженість магнітного поля у спинці якоря, що відповідає магнітної індукції B_j (додаток 4 [1]);

$k_j = 0,57$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу індукції в спинці якоря (таблиця 4 [1]).

$$g' = g \cdot \frac{k_{\text{м.ц}}}{k'_{\text{м.ц}}} = 37,51 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1,05}{1,04} = 37,86 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$



2.2.58. По рис.Б1 додатку Б для $B_{\delta} = 0,4$ Тл, $g = 39,3 \cdot 10^{-6}$ знаходимо напруженість магнітного поля, що забезпечує необхідну стабілізацію магніту

$$H_{\text{ст}} = 51790 \text{ А/м.}$$

2.2.59. Визначимо струм стабілізації магніту

$$I_{\text{ст}} = \frac{H_{\text{ст}}}{k_{H \text{ max}}} = \frac{51790}{11050} = 4,69 \text{ А.}$$

2.2.60. Уточнюємо значення реакції якоря $H_{\text{ядmax}}$ і питому провідність для корисного потоку g

$$H_{\text{ядmax}} = k_{H \text{ max}} \cdot I_{\text{разм}} = 11050 \cdot 3,1 = 34290 \text{ А / м.}$$

По рис.Б.1 додатку Б для $B_{\delta} = 0,4$ Тл і $H_{\text{ядmax}} = H_{\text{ст}} = 34290 \text{ А / м}$ знаходимо $g = 15,58 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$

По рис.Б.2 додатку Б для $B_{\delta} = 0,4$ Тл і $g_{\text{св}} = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ знаходимо $g = 27,9 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$

Приймаємо з деяким запасом $g = 31 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$

2.2.61. Визначимо значення повітряного зазору для значення мінімально припустимої провідності (без пропускання по явірній обмотці струму $I_{\text{ст}}$)

$$\sigma = \mu_0 \cdot \left(\frac{k_{\text{м.л}} \cdot D}{2 \cdot g} - \frac{H_z \cdot h_z + k_j \cdot H_j \cdot l_j}{B_{\delta}} \right) = 1,256 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,51 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 31 \cdot 10^{-6}} - \frac{170 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} + 0,57 \cdot 170 \cdot 13,1 \cdot 10^{-3}}{0,4} \right) = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м;}$$

$$\begin{aligned} \delta &= 0,1 \cdot \left[\sqrt{(5 \cdot \sigma + b_{\text{ш}})^2 - 6,37 \cdot \frac{Z}{D} \cdot \sigma \cdot b_{\text{ш}}^2} + 5 \cdot \sigma - b_{\text{ш}} \right] = \\ &= 0,1 \cdot \left[\sqrt{(5 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} + 1,4 \cdot 10^{-3})^2 - 6,37 \cdot \frac{18 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot (1,4 \cdot 10^{-3})^2}{28 \cdot 10^{-3}}} + \right. \\ &\quad \left. + 5 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} - 1,4 \cdot 10^{-3} \right] = 2,37 \cdot 10^{-4} > 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ м.} \end{aligned}$$

2.2.62. Перевіримо правильність розрахунку $H_{\text{ст}}$ і стійкість магніту до розмагнічування явірним струмом ($H_{\text{ядmax}} \leq H_{\text{ст}}$) графоаналітичним способом.

51					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		51

Крива розмагнічування (рис.2.3) описується вираженням

$$B = B_r \cdot \frac{H_c - H}{H_c - a_B \cdot H} = 0,9 \cdot \frac{55000 - H}{55000 - 0,642 \cdot H}.$$

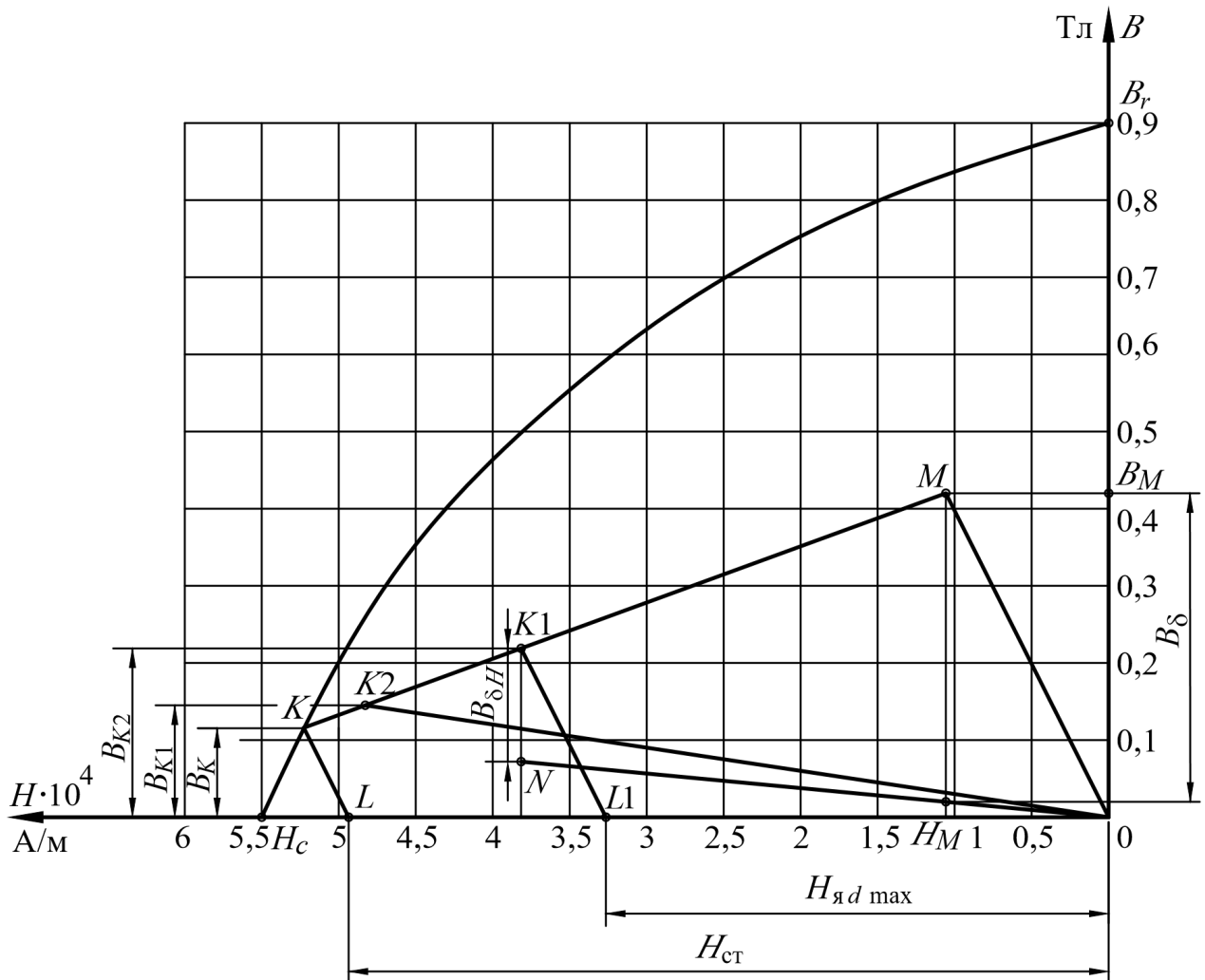


Рис.2.3. Робоча діаграма магніту

Будуємо пряму OM

$$B = g_0 \cdot H = (g + g_s) \cdot H = 39,76 \cdot 10^{-6} \cdot H$$

з координатами точки M

$$B_M = B_\delta \frac{g_0}{g} = 0,4 \cdot \frac{39,76 \cdot 10^{-6}}{37,86 \cdot 10^{-6}} = 0,42 \text{ Тл};$$

$$H_M = \frac{B_\delta}{g} = \frac{0,4}{37,86 \cdot 10^{-6}} = 10570 \text{ A/M.}$$

Далі проводимо пряму повернення MK

$$B = \left(1 + \frac{\rho}{g_0}\right) \cdot B_M - \rho \cdot H = \left(1 + \frac{7,3 \cdot 10^{-6}}{39,76 \cdot 10^{-6}}\right) \cdot 0,42 - 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot H = 0,497 - 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot H$$

Координати точки K визначимо з графіка (рис.2.3)

$$B_K = 0,116 \text{ Тл}; H_K = 52240 \text{ А/м.}$$

З точки K проводим луч KL під кутом $\arctg(m_B/m_H)g_0$ до осі абсцис (m_B, m_H – масштаби по відповідних осях)

$H_{ст}$ визначається по величині відрізка OL

$$H_{ст} = g_0 \cdot OL / g \cdot m_H = 51880 \text{ А/м.}$$

Погрішність розрахунку

$$\frac{51880 - 51790}{51790} \cdot 100 = 0,17\%$$

З точки $K1$ проведемо пряму $K1L1$ паралельно прямій OM

$$B = g_0 \cdot H - g \cdot H_{я.d \max} = 39,76 \cdot 10^{-6} \cdot H - 37,86 \cdot 10^{-6} \cdot 34290 = \\ = 39,76 \cdot 10^{-6} \cdot H - 1,298.$$

Координати точки $K1$ з урахуванням того, що відрізки OL і $OL1$ пропорційні $g \cdot H_{я.d} / g_0$

$$B_{K1} = B_M - \frac{\rho \cdot g_0 \cdot H_{я.d \max}}{g_0 + \rho} = 0,42 - \frac{7,3 \cdot 10^{-6} \cdot 39,76 \cdot 10^{-6} \cdot 34290}{39,76 \cdot 10^{-6} + 7,3 \cdot 10^{-6}} = 0,209 \text{ Тл};$$

$$H_{K1} = \frac{B_M}{g_0} + \frac{g_0 \cdot H_{я.d \max}}{g_0 + \rho} = \frac{0,42}{39,76 \cdot 10^{-6}} + \left(\frac{39,76 \cdot 10^{-6} \cdot 34290}{39,76 \cdot 10^{-6} + 7,3 \cdot 10^{-6}} \right) = 39540 \text{ А/м.}$$

Відрізок $OL1$ у відповідному масштабі дає значення з погрішністю

$$H_{я.d \max} = g_0 \cdot OL1 / g \cdot m_H = 34340 \text{ А/м.} \quad \frac{34340 - 34290}{34290} \cdot 100 = 0,15\%.$$

Тобто умова стійкості магніту до розмагнічування якірним струмом виконується

$$H_{я.d \max} \leq H_{ст}.$$

Крім того побудуємо

пряму ON $B = g_s \cdot H = 1,9 \cdot 10^{-6} \cdot H$

і пряму $OK2$ $B = g_{св} \cdot H = 3,0 \cdot 10^{-6} \cdot H.$

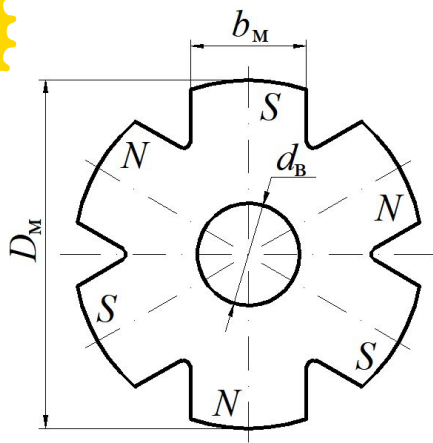


Рис.2.4. Шестиполусный монолитный индуктор

Координати точки K_2 для вип. 1
стабілізації магніту у вільному стані

$$B_{K2} = \frac{1 + \frac{\rho}{g_0}}{1 + \frac{\rho}{g_{scb}}} B_M = \frac{1 + \frac{7,3 \cdot 10^{-6}}{39,76 \cdot 10^{-6}}}{1 + \frac{7,3 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}}} 0,42 = 0,145 \text{ Тл};$$

$$H_{K2} = \frac{B_{K2}}{g_{scb}} = \frac{0,145}{3 \cdot 10^{-6}} = 48280 \text{ А/м}.$$

Як видно з рис.2.4 питома провідність розсіювання у вільному стані g_{scb} більше питомої провідності, яка забезпечує необхідну стабілізацію магніту

$$g_{scb,ct} = \frac{B_K}{H_K} = \frac{0,116}{52240} = 2,22 \cdot 10^{-6} < 3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}.$$

2.2.63. Якщо магніт розмагнічується під дією реакції якоря $H_{я.d}$, то по закінченню цієї дії індукція в зазорі БДПС $B_{\delta я}$ не повинна бути менш необхідної B_{δ} при стабілізації магніту якірним струмом I в вільному стані тобто

$$B_{\delta я} = f(H_{я.d \max}, g) \geq B_{\delta}, B_{\delta cb} = f(g) \geq B_{\delta}.$$

Перевіримо виконання цієї умови графічним шляхом. За відомим значенням $H_{я.d \max}$, g і g_{scb} за допомогою графіків $B_{\delta я} = f(H_{я.d \max}, g)$ (рис.Б.1) і $B_{\delta cb} = f(g, g_{scb})$ (рис. Б.2) визначимо значення $B_{\delta я}$ і $B_{\delta cb}$

$$B_{\delta я} = 0,585 \text{ Тл} > 0,4 \text{ Тл}; B_{\delta cb} = 0,426 \text{ Тл} > 0,4 \text{ Тл}.$$

Тобто умова виконується.

2.2.64. Визначимо розміри постійного магніту (рис.2.4)

$$D_M = D - 2\delta = 28 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,19 \cdot 10^{-3} = 27,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_M = D \cdot (\pi \cdot \alpha / 2p) = 28 \cdot 10^{-3} \cdot (\pi \cdot 0,667 / 2 \cdot 3) = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Приймаємо

$$D_M = 27,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; b_M = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

2.3. Розрахунок характеристик БДПС

2.3.1. Розраховуємо і будуємо робочі характеристики двигуна $n, \eta_d, I_d, M_2 = f(P_2)$, для чого приведемо розрахункові рівняння ($\theta = \psi = 0$)

$$\bar{n}_i = n_i / n_n; \beta_i = \beta / \bar{n}_i; k_{\beta i} = 1 - \frac{(1 - e^{-\beta_i})}{\beta_i}; k_{\beta 1i} = \frac{(1 - e^{-\beta_i})}{k_{\beta i}}$$

$$I_i = I_{\text{эми}} = U(1 - \bar{n}_i \cdot k_e) \cdot k_{\beta i} / R; P_{\text{эми}} = U \cdot \bar{n}_i \cdot k_e \cdot I_{\text{эми}};$$

$$P_{di} = U \cdot k_d \cdot I_i; P_{\text{стi}} = P_{\text{ст}} \cdot (\bar{n}_i)^{4/3}; P_{\text{тр.пi}} = P_{\text{тр.п}} \cdot n_i; P_{\text{тр.вi}} = P_{\text{тр.в}} \cdot (\bar{n}_i)^3;$$

$$P_{\text{с.м.ди}} = P_{\text{стi}} + P_{\text{тр.пi}} + P_{\text{тр.вi}} + P_{di};$$

$$P_y = \frac{U_y^2 \cdot C_{\text{вх}}}{T_y} = \frac{10^2 \cdot 320 \cdot 10^{-12}}{8 \cdot 10^{-4}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт};$$

$$P_{\text{перi}} = \frac{1}{2} \cdot U_{\text{откл}} \cdot \frac{T_{\text{откл}}}{T} \cdot I_i \cdot k_{\beta 1i}; P_{2i} = P_{\text{эми}} - P_{\text{с.м.ди}}; P_{DSi} = k_{\beta 2} \cdot I_i^2 \cdot R_{DS};$$

$$M_{2i} = \frac{9,55}{n_n} \cdot \frac{P_{2i}}{\bar{n}_i} \cdot 10^{-3};$$

$$\eta_i = \frac{P_{2i}}{U_n \cdot I_i}; \eta_{di} = \frac{P_{2i}}{U_n \cdot I_i + P_{\text{перi}} + P_{yi} + P_{DSi}}; I_{di} = \frac{P_{2i}}{U_n \cdot \eta_{di}}.$$

Задаючись значеннями n , по приведених формулах розраховуємо (табл.2.2) і будуємо (рис.2.5) робочі характеристики спроектованого БДПС.

Таблиця.2.2. Робочі характеристики БДПС

Пара-метр	Одиниця виміру	Значення параметрів двигуна при частоті обертання, об/хв				
		869,5	820	750	700	630
$\bar{n}_i$	—	1,15	1,093	1	0,935	0,84
β_i	—	5,43	5,758	6,295	6,745	7,494
$k_{\beta i}$	—	0,817	0,827	0,841	0,852	0,867
$k_{\beta 1i}$	—	1.219	1,206	1,186	1,172	1,153
$I_i, I_{\text{эми}}$	мА	24,24	87,82	180,4	248,5	346,6

Продовження таблиці 2.2.

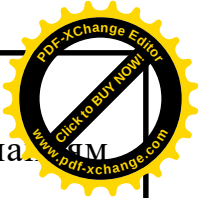
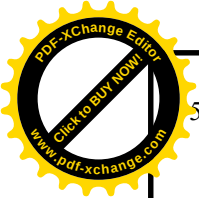
$P_{\Sigma i}$	Вт	0,569	1,945	3,654	4,7	5,9
$P_{\Sigma Ti}$	Вт	0,488	0,451	0,4	0,365	0,317
$P_{\Sigma Tr, \Pi i}$	Вт	0,062	0,058	0,053	0,05	0,045
$P_{\Sigma Tr, \Pi i}$	Вт·10 ⁻³	1,33	1,18	0,856	0,7	0,51
$P_{\Sigma di}$	Вт	0,017	0,063	0,13	0,179	0,25
$P_{\Sigma c, m, di}$	Вт	0,568	0,574	0,584	0,595	0,612
$P_{\Sigma yi}$	Вт·10 ⁻⁵	4	4	4	4	4
$P_{\Sigma \text{пер} i}$	Вт·10 ⁻⁵	5,12	18,3	37,1	50,5	69,3
$P_{\Sigma DSi}$	Вт·10 ⁻³	0,19	2,49	11	20	39
$P_{\Sigma 2i}$	Вт	0	1,371	3,07	4,103	5,285
$M_{\Sigma 2i}$	Н·м·10 ⁻³	0	15,97	39,09	55,98	80,11
η_i	—	0	0,651	0,709	0,688	0,635
η_{di}	—	0	0,65	0,707	0,686	0,632
I_{di}	мА	24,25	87,93	180,9	249,7	348,2

При номінальній потужності на валу БДПС має наступні характеристики $n_n = 753$ об/хв; $\eta_n = 70,76$ %; $I_{Dn} = 0,177$ А; $M_{2n} = 38,1 \cdot 10^{-3}$ Н·м, $n_0 = 869,5$ об/хв.

2.3.2. Механічні характеристики двигуна розраховуємо і будуємо, зневажаючи індуктивністю обмотки якоря, та з урахуванням її. Для розглянутої схеми ТК (рис.1.3 в), керованого за допомогою ШІМу частоту імпульсів f_i доцільно вибирати більше частоти основної (природної) комутації $f_{\text{осн}}$.

$$f_{\text{осн}} = 1/T = 1/8,89 \cdot 10^{-3} = 112,5 \text{ Гц.}$$

При цьому $f_{\text{осн}} \leq f_{\text{пр}} / (5 \dots 10)$, де під граничною частотою імпульсів мається на увазі частота, при якій утрати на переключення транзисторів стають переважними втратами в електроприводі. Для сучасних транзисторів $f_{\text{пр}} > 10$ кГц.



Орієнтовно частота імпульсів f_i може бути обрана з дотримання наступних умов

$$f_i > (5 \dots 10)f_{\text{осн}}, f_i < f_{\text{пр}}, f_i > f_{i.\text{гр}},$$

де $f_{i.\text{гр}}$ – гранична частота імпульсів, при котрій ще має місце режим безперервних струмів.

Вибираємо $f_i = 1250$ Гц.

Механічні характеристики побудуємо у відносних одиницях, прийнявши за базисні величини кутову швидкість ідеального холостого ходу ω_0 і пусковий момент $M_{\text{п}}$.

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 869,5}{60} = 91,05 \text{ с}^{-1}.$$

Розглядаючи якірну обмотку з комутатором як імпульсний ланцюг, для випадку прямокутної противо-ЕРС, нейтральної комутації і $f_i > f_{i.\text{гр}}$ можна одержати вираження для миттєвого значення струму в секціях якірної обмотки на двох інтервалах часу (коли секція підключена до джерела і відключена від нього) і механічних характеристик у відносних одиницях:

для $0 \leq t \leq \gamma T_i$

$$i_{1*}(n_i, t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdot \frac{1 - \exp[-\beta_i(1 - \gamma)] + [\exp(\beta_i \cdot \gamma) - 1] \exp[-\beta_i(n_i + 1)]}{1 - \exp(-\beta_i)} - \omega_* \left[1 - \exp\left(-\beta_i n_i - \frac{t}{\tau}\right) \right]; \quad (2.3)$$

для $\gamma T_i \leq t < T_i$

$$i_{2*}(n_i, t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdot \frac{[\exp(\beta_i \cdot \gamma) - 1] \{1 - \exp[-\beta_i(n_i + 1)]\}}{1 - \exp(-\beta_i)} - \omega_* \left[1 - \exp\left(-\beta_i n_i - \frac{t}{\tau}\right) \right]; \quad (2.4)$$

$$m_{\text{ем}*} = \frac{1}{T} \sum_{n_i=0}^N \left[\int_0^{\gamma T} i_{1*}(n_i, t) dt + \int_{\gamma T}^T i_{2*}(n_i, t) dt \right], \quad (2.5)$$

де $T_i = 1/f_i = 1/1250 = 8 \cdot 10^{-4}$ с – період проходження імпульсів;

					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
57						57
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

58

$\beta_i = T_i / \tau = 8 \cdot 10^{-4} / 1,816 \cdot 10^{-3} = 0,441$ – відношення періоду імпульсу

електричної постійної часу двигуна τ ;

$\tau = L_s / R = 31,7 \cdot 10^{-3} / 17,47 = 1,816 \cdot 10^{-3}$ с;

$N = T / T_i = 8,89 \cdot 10^{-3} / 8 \cdot 10^{-4} = 11$ – число імпульсів на період природної комутації;

γ - відношення інтервалу включення до суми інтервалів включення і відключення;

$n_i = 0 - N$ - порядковий номер імпульсів.

Обчислення механічної характеристики по вираженнях (2.3.)...(2.5.) представляються скрутними. Однак при досить високій частоті імпульсів вираження (2.5.) спрощується

$$m_{em*}(\omega_*) = \gamma - \frac{[e^{-\beta_i \cdot (1-\gamma)} - e^{-\beta_i}]}{1 - e^{-\beta_i}} \cdot [1 - k_\beta(\omega_*)] - \omega_* \cdot k_\beta(\omega_*) \quad (2.6.)$$

$$\text{де } k_\beta(\omega_*) = 1 - \frac{(1 - e^{-\beta(\omega_*)})}{\beta(\omega_*)}; \quad \beta(\omega_*) = \frac{T(\omega_*)}{\tau}; \quad T(\omega_*) = \frac{2\pi}{p \cdot m \cdot \omega_0 \cdot \omega_*}.$$

Задаючись значеннями ω_* , розрахуємо по 2.6. (табл.2.3) і побудуємо (рис.2.6) механічні характеристики БДПС без урахування індуктивності обмотки якоря ($\tau \rightarrow 0$) та з урахуванням неї. Пунктирними лініями показані характеристики, побудовані з урахуванням режиму переривчастих струмів.

Таблиця 2.3. Механічні характеристики БДПС

ω_*	m_{em*}					
	Без урахування індуктивності L_s			З урахуванням індуктивності L_s		
	$\gamma = 1$	$\gamma = 0,75$	$\gamma = 0,5$	$\gamma = 1$	$\gamma = 0,75$	$\gamma = 0,5$
0	1	0,75	0,5	1	0,75	0,5
0,1	0,9	0,65	0,4	0,879	0,636	0,392
0,2	0,8	0,55	0,3	0,762	0,526	0,288
0,3	0,7	0,45	0,2	0,65	0,421	0,19
0,4	0,6	0,35	0,1	0,543	0,321	0,096
0,5	0,5	0,25	0	0,441	0,226	0

Продовження таблиці 2.3.

0,6	0,4	0,15		0,344	0,135	
0,7	0,3	0,05		0,251	0,049	
0,8	0,2	0		0,163	0	
0,9	0,1			0,08		
1,0	0			0		

2.4. Розробка ДПР

Відповідно до положень, викладених у п.1.5, вибираємо ДПР, робота якого заснована на використанні ефекту Холу. Зовнішній вид та конструкція розробленого ДПР, сполученого с транзисторним комутатором К (рис.1.3в) представлена на рис.2.7. Він складається зі сталеві шасі 7, у якій закріплена склотекстолітова плата друкованого монтажу 5 (рис.2.8) із шістьма датчиками Холу 11 - по трьох на кожен напрямок обертання (для забезпечення реверса) двигуна і елементи транзисторного комутатора (силові польові транзистори 1, діоди 3,6, резистори 2, мікросхема формувача імпульсів 10). Датчики Холу розташовані рівномірно, через 40° відносно один одного, при цьому датчики одного напрямку обертання зрушені щодо відповідних датчиків іншого напрямку обертання на 60°. Якір збірний, складається з плашок з магнітотвердого матеріалу, які закріплені на гранях призми з магнітом'якого матеріалу ЮНДК18 з робочим сектором, що охоплює кут

$$\frac{2\pi}{p \cdot m} = \frac{2 \cdot 180}{3 \cdot 3} = 40^\circ.$$

В даний час розроблена і виробляється досить велика кількість датчиків Холу. У даному дипломному проекті доцільне використання спеціалізованої мікросхеми A3245 фірми *Allegro MicroSystems, Inc.*, що має ряд особливостей і переваг [11]:

1. Незалежність від напрямку магнітного поля, що впливає;
2. Висока температурна стабільність;

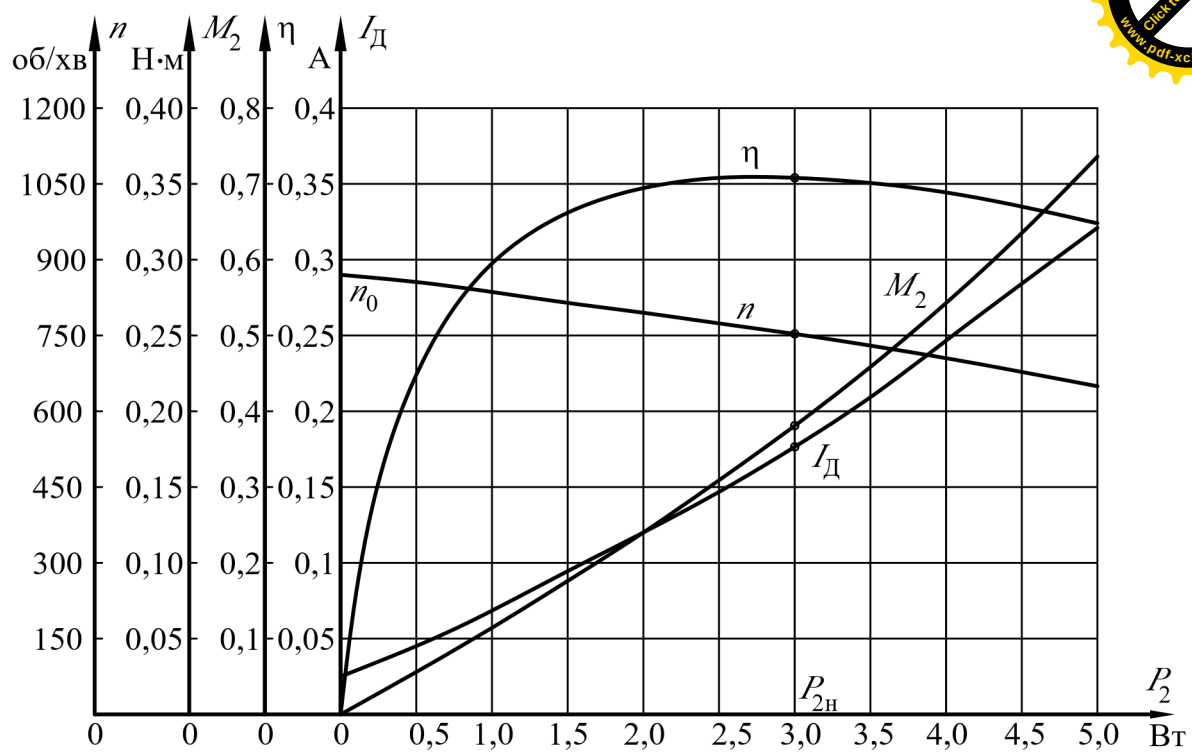


Рис.2.5. Робочі характеристики БДПС

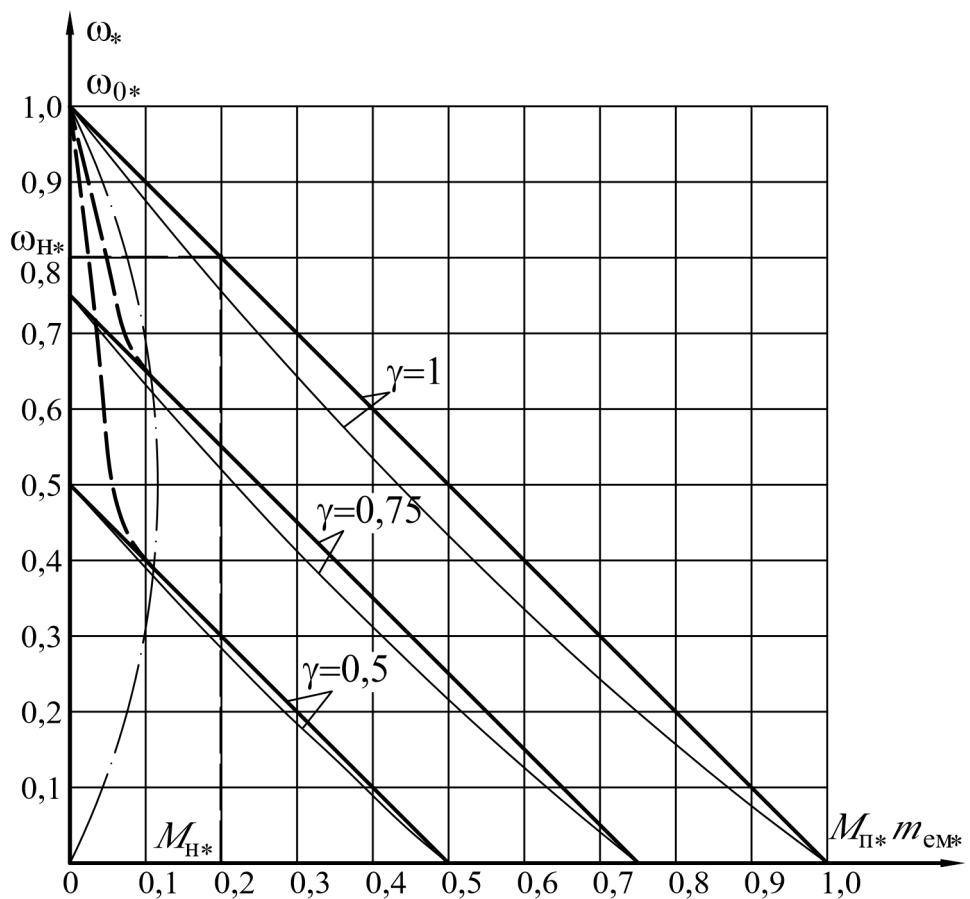


Рис.2.6. Механічні характеристики БДПС

- без урахування індуктивності обмотки якоря;
- з урахуванням індуктивності обмотки якоря;
- - - - границя розривності струму якоря

3. Гранично низькі витоки електронних ключів;
4. Захист від вібрації і перешкод;
5. Захист від коротких замикань і реверса полярності живлення;
6. Нечутливість до фізичних навантажень;
7. Невеликі розміри.

Мікросхема А3245 являє собою двохполярний, високочутливий комутатор з цифровим виходом, функціональна схема якого представлена на рис.2.8, а технічні характеристики - у табл.2.4.

Характеристика	Позначення	Один. виміру	Параметри виміру	Значення
Напруга живлення	U_{cc}	В	$T_K < 165^\circ\text{C}$	24
Вихідна напруга	$U_{вих}$	мВ	$I_{вих} = 20 \text{ мА}; B > B_{вкл}$	500
Вихідний струм	$I_{вих}$	мА	$B > B_{вкл}$	45
Витрачуваний струм	I_{cc}	мА	$B > B_{вкл}, B < B_{вим}$	5
Індукція включення	$B_{вкл}$	Г	Магнітне поле спрямоване перпендикулярно чуттєвому елементові	± 38
Індукція вимикання	$B_{вим}$	Г	Магнітне поле спрямоване перпендикулярно чуттєвому елементові	± 20
Час включення/вимикання	t_b	мс	$R_H = 820 \text{ Ом}, C_s = 20 \text{ пФ}$	1
Температура навколишнього середовища	T_A	$^\circ\text{C}$		$-40 \div 150$
Температура корпусу	$T_{K(max)}$	$^\circ\text{C}$		165
Питомий термічний опір корпусу	$R_{\theta KA}$	$^\circ\text{C} / \text{Вт}$		228

Кремнієвий чип А3245 містить у собі наступні основні компоненти (рис. 2.8): регулятор напруги 1, що дозволяє функціонувати пристроєві в широкому діапазоні напруги живлення і температури навколишнього середовища, що досягає 150°C , чуттєвий елемент Холу 2, підсилювач слабкого сигналу 3, пристрій динамічного гасіння вібрації 4, логічний блок /таймер 5, пристрій

вибірки - збереження 6, проміжний підсилювач 7, низькочастотний фільтр Шмітта 9, блок захисту від к.з. 10 з вихідним ключем на польовому

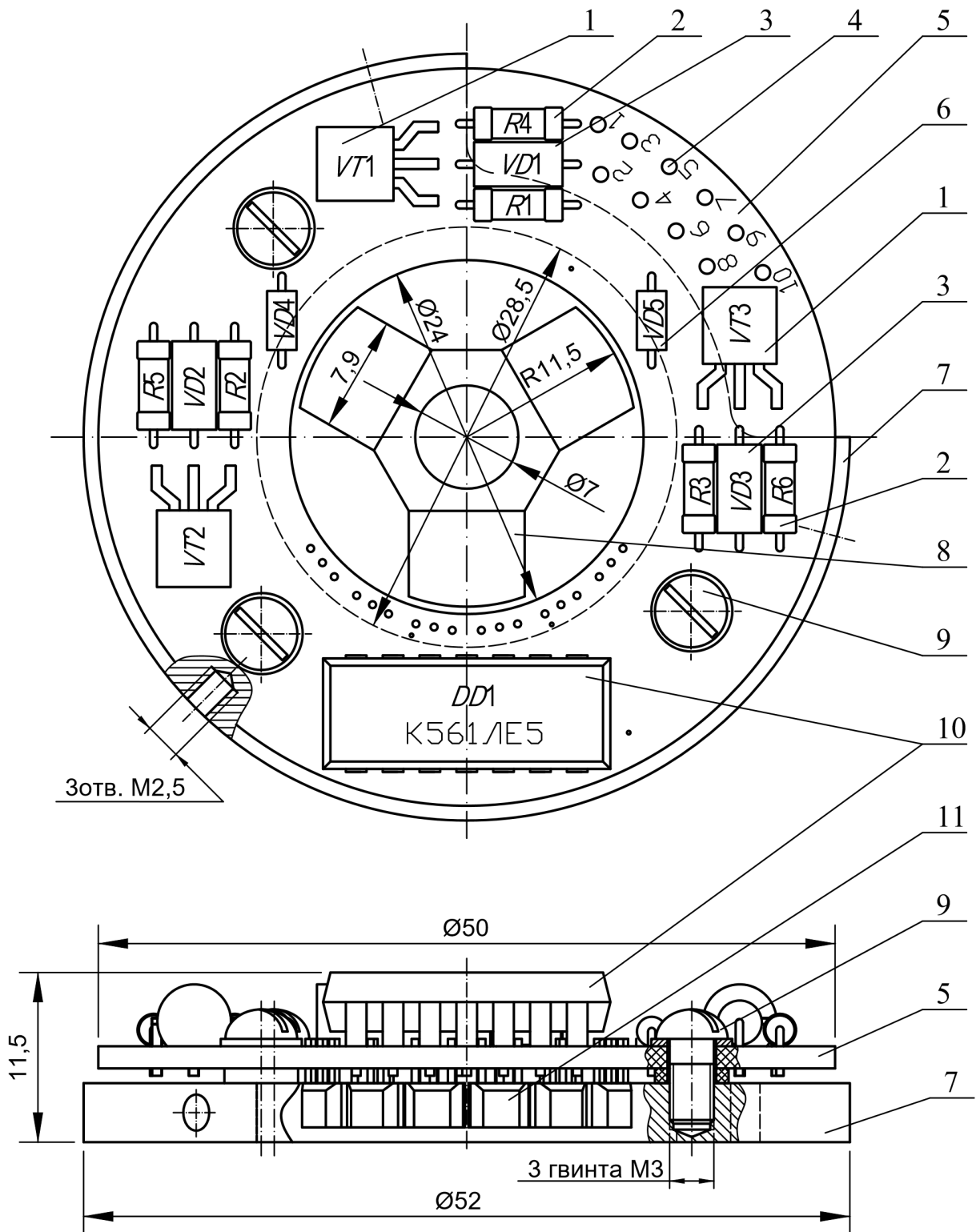


Рис.2.7. Конструкція ДПР

1-транзистор (3 шт); 2 -резистор (6 шт); 3 -діод силової (3 шт); 4 – отвори для зовнішніх з'єднань (10 шт); 5 - плата друкованого монтажу; 6 – діод малопотужний (2 шт); 7 - шасі; 8 - якір; 9 - гвинт (3 шт); 10 - мікросхема (1 шт); 11 -датчик Хола (6 шт)

62				
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141. 4361. БР. ПЗ. Р2

Лист
62

транзисторі 11, блок контролю 12. Застосування *BiCMOS* технології дозволяє розробити спеціалізовані пристрої низької напруги, з оптимальним компонуванням елементів, дуже низькою погрішністю вхідних і вихідних сигналів, високим ступенем перешкодозахищеності і вібростійкості, малими геометричними розмірами.

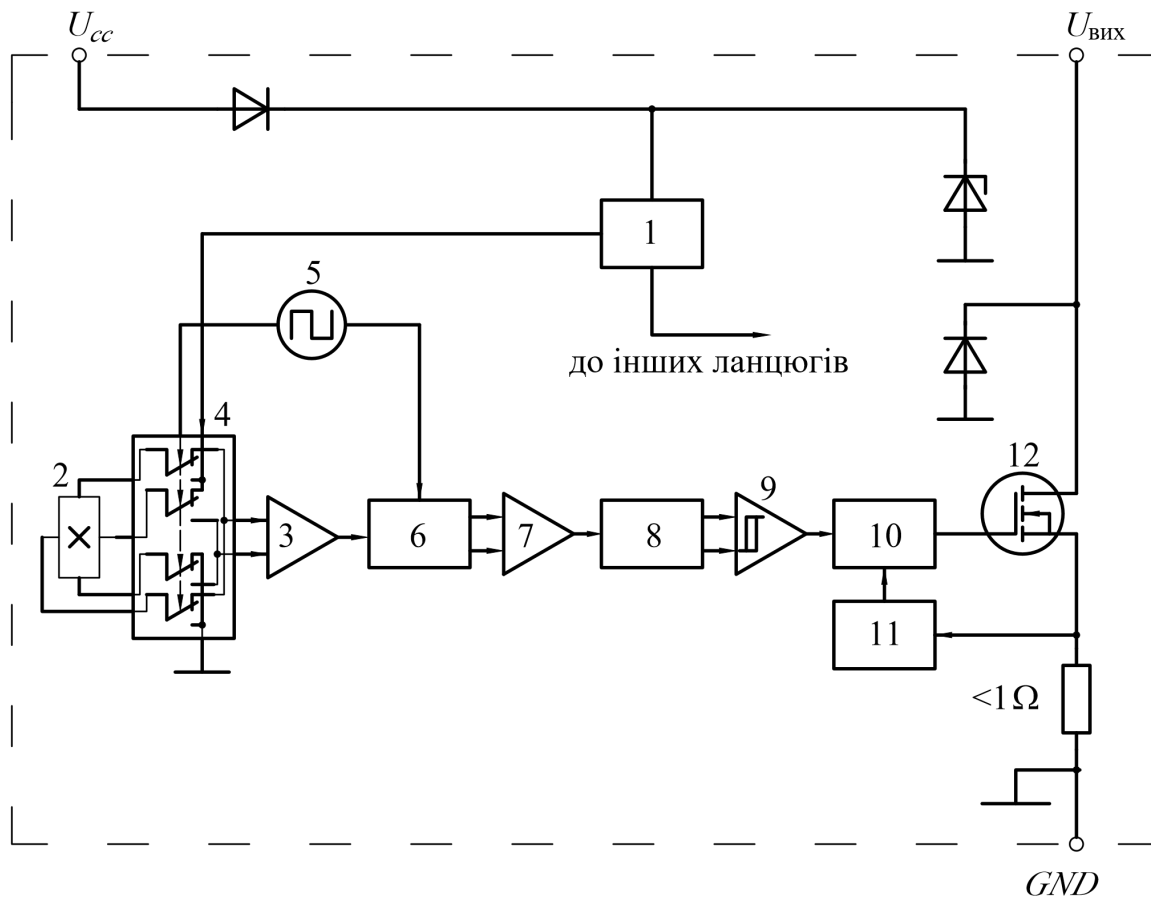


Рис.2.8. Функціональна схема пристрою A3245

Вихід пристрою A3245 підключається до зовнішніх ланцюгів, коли магнітне поле, впливаючи перпендикулярно на його чуттєвий елемент, досягає точки $B_{\text{вкл}N}$ (або знижується до точки $B_{\text{вкл}S}$) (рис.2.9). Вихідна напруга при цьому дорівнює $U_{\text{вих.вкл}}$. Блок контролю при перевантаженні обмежує струм вихідного транзистора до значення I_{OM} . Коли магнітне поле знижується до точки $B_{\text{вим}N}$ (збільшується до точки $B_{\text{вим}S}$), пристрій відключається. Різниця між значеннями магнітної індукції $B_{\text{вкл}}$ і $B_{\text{вим}}$ складає гістерезис датчика $B_{\text{гіс}} = |B_{\text{вкл}N(S)}| - |B_{\text{вим}N(S)}|$.

Гістерезис забезпечує надійне спрацювання комутатора при впливі зовнішньої механічної вібрації й електричних шумів. Для визначення напруги живлення пристрою A3245 розглянемо найбільш несприятливий температурний

режим роботи, а саме:

температура навколишнього середовища $T_A = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$;

температура корпусу $T_{\text{к(max)}} = 165\text{ }^{\circ}\text{C}$;

витрачуваний струм $I_{\text{cc(max)}} = 5\text{ мА}$;

питомий тепловий опір корпусу $R_{\theta\text{кА}} = 228\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$.

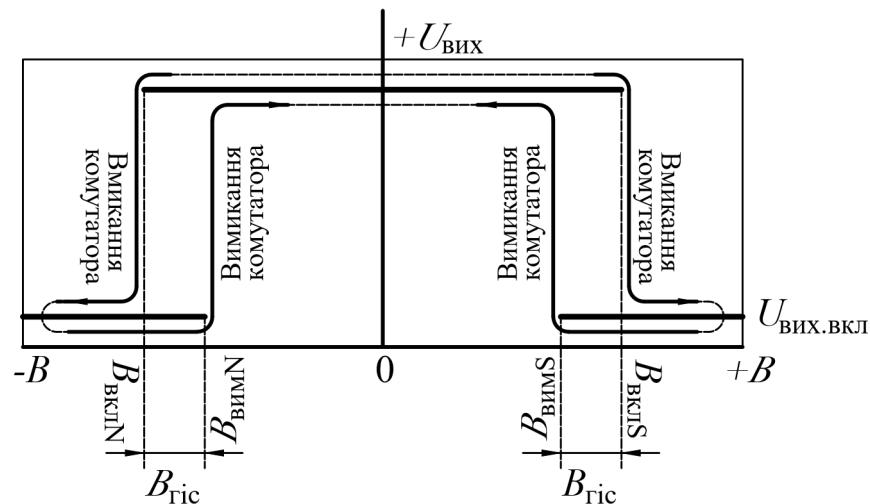


Рис.2.9. Діаграма роботи пристрою A3245

Визначимо різницю температур корпусу і навколишнього середовища

$$\Delta T_{\text{max}} = T_{\text{к(max)}} - T_A = 165 - 150 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Потужність, що тоді розсіюється, дорівнює

$$P_{D(\text{max})} = \Delta T_{\text{max}} / R_{\theta\text{кА}} = 15 / 228 = 65,8\text{ мВт}.$$

Необхідна напруга живлення

$$U_{\text{cc(предв)}} = P_{D(\text{max})} / I_{\text{cc(max)}} = 65,8 / 5 = 13,2\text{ В}.$$

У результаті одержуємо, що при температурі T_A пристрій розсіює адекватну кількість тепла при напрузі живлення, рівному $U_{\text{cc(предв)}}$. Через те, що в нашому випадку температура БДПС не перевищує $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (див. п.2.2.47.), приймаємо напругу живлення $U_{\text{cc}} = 12\text{ В}$, що погодиться з необхідним рівнем напруги живлення схеми керування БДПС.

2.5. Обґрунтування вибору датчика швидкості

У даному дипломному проекті, як наголошувалося в Р1, доцільно замість електромеханічного датчика швидкості (тахогенератора)

						Лист
64					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	64
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати електронний перетворювач частота – напруга ПЧН.

цьому вхідним сигналом можуть служити імпульси, що поступають з датчика Холу ДПР.

Як ПЧН вибираємо спеціалізовану мікросхему *LM2907* [12]. Технічні параметри приведені в табл.2.5, структурна схема і типова схема включення для роботи в режимі тахометра представлена на рис.2.10. Для здобуття необхідного рівня напруги на виході пристрою необхідно розрахувати значення опору *R1* і конденсатора *C1*, за допомогою яких підбирається необхідний коефіцієнт перетворення.

Таблиця.2.5 Технічні характеристики мікросхеми *LM2907*

Характеристика	Позначення	Один. виміру	Параметри виміру	Значення
Напруга живлення максимальна / типова	U_{ccmax} $/U_{cc}$	В	$T_k = 25^\circ\text{C}$	28 / 15
Вихідна напруга високого рівня	$U_{вих\text{ "1"}}$	В	$U_{BX} = +125\text{ мВ}; (\text{н.2})$	8,3
Вихідна напруга низького рівня	$U_{вих\text{ "0"}}$	В	$U_{BX} = -125\text{ мВ}; (\text{н.2})$	2,3
Вихідний струм	$I_{вих}$	мА	$U_2 = U_3 = 6\text{ В}; (\text{н.2,3})$	180
Коефіцієнт посилення	K		$U_{вих\text{ "1"}} = 2/3 U_{cc}$ $U_{вих\text{ "0"}} = 1/3 U_{cc}$	1
Лінійність перетворення		%	$f_{BX} = 1, 5, 10\text{ кГц}$	0,3
Температура навколишнього середовища	T_A	$^\circ\text{C}$		$-65 \div 150$

Мікросхема *LM2907* досить складний пристрій, основними вузлами якого є вхідний підсилювач з гістерезисом, накопичувач заряду, підсилювач – компаратор, джерело опорної напруги.

З приведених даних заздалегідь можна сказати, що як електричні (вихідна напруга, напруга живлення, лінійність), так і масогабаритні показники обраного ПМЧ відповідають параметрам спроектованого двигуна и схеми керування. Необхідні розрахунки елементів представленні в Р.3.

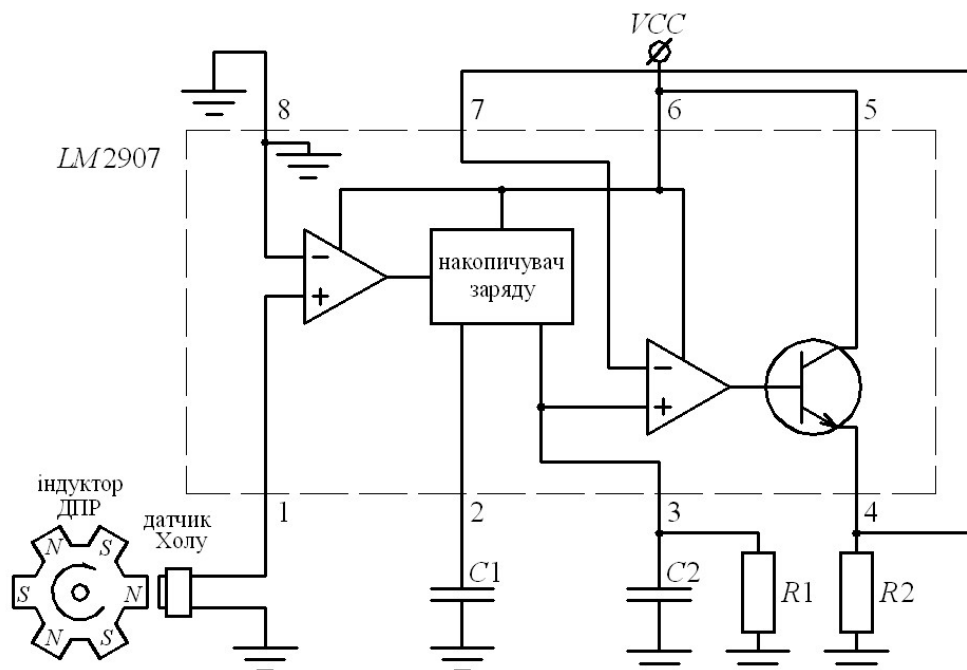


Рис.2.10. Структурна і типова схема включення мікросхеми LM2907

2.6. Визначення постійної часу двигуна

Постійна часу визначається з метою розрахунку динамічних характеристик двигуна, також для визначення часу розвантажування двигуна до номінальної швидкості, а також для визначення часу, необхідного для переходу з однієї швидкості на іншу.

Для розрахунку динамічних характеристик необхідне значення електромеханічної постійної часу. Динамічні характеристики можна визначити за методикою, запропонованою в [1].

2.6.1. Наближене значення постійної часу двигуна дорівнює:

$$T' = 0,76 \cdot 10^{-3} \cdot P_{2H}^{\frac{2}{3}} \cdot \omega_0^{\frac{1}{3}} = 0,72 \cdot 10^{-3} \cdot 3^{\frac{2}{3}} \cdot 91,05^{\frac{1}{3}} = 7,11 \text{ мс.} \quad (2.7)$$

2.6.2. Маса магніту двигуна визначимо з вираження:

$$G_{M.d} = \gamma_M \cdot 10^3 \cdot S_{M.d} \cdot L_{M.d} = 7,3 \cdot 10^3 \cdot 4,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,042 = 0,147 \text{ кг.}$$

де $\gamma_M = 7,3 \text{ г/см}^3$ – питома маса магніту ротора ;

$L_{M.d} = L = 0,042 \text{ м}$ – довжина магніту уздовж подовжньої осі;

$S_{M.d}$ – площа поперечного переріза магніту двигуна

$$S_{\text{м.д}} = \frac{p \cdot b_{\text{м}}}{\pi} (\pi D_{\text{м}} - p \cdot b_{\text{м}}) - \pi \left(\frac{d_{\text{в1}}}{2} \right)^2 = \frac{3 \cdot 9,5}{\pi} (\pi 27,62 - 3 \cdot 9,5) \cdot 10^{-6} - \pi \left(\frac{0,008}{2} \right)^2 =$$

$$= 4,78 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$d_{\text{в1}} = 8 \text{ мм}$ – внутрішній діаметр магніту двигуна (вала).

2.6.3. Момент інерції магніту двигуна дорівнює:

$$J_{\text{м}} = \frac{G_{\text{м.д}}}{8} \cdot (D_{\text{м}}^2 + d_{\text{в1}}^2) = \frac{0,147}{8} \cdot \left[(27,62 \cdot 10^{-3})^2 + (8 \cdot 10^{-3})^2 \right] = 1,516 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

2.6.4. Маса вала визначається наступним співвідношенням:

$$G_{\text{в}} = \frac{\gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-3} \pi}{4} \cdot d_{\text{в.ср}}^2 \cdot L_{\text{в}} = \frac{7,8 \cdot 10^3 \cdot \pi}{4} \cdot (7,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,09 = 31 \cdot 10^{-3} \text{ кг},$$

де $d_{\text{в.ср}} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – середній діаметр вала;

$\gamma_{\text{ст}} = 7,8 \text{ г/см}^3$ – питома маса сталі;

$L_{\text{в}} = 0,09 \text{ м}$ – загальна довжина вала двигуна.

2.6.5. Момент інерції вала двигуна дорівнює:

$$J_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot \frac{d_{\text{в.ср}}^2}{8} = 31 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(7,5 \cdot 10^{-3})^2}{8} = 2,18 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

2.6.6. Маса індуктора ДПР складається з маси плашок $G_{\text{пл}}$ і маси призми $G_{\text{пр}}$:

$$G_{\text{і}} = G_{\text{пл}} + G_{\text{пр}} = (S_{\text{пл}} \cdot \gamma_{\text{м}} + S_{\text{пр}} \cdot \gamma_{\text{ст}}) \cdot L_{\text{і}} \cdot 10^3 =$$

$$= (1,37 \cdot 10^{-4} \cdot 7,3 + 6,32 \cdot 10^{-5} \cdot 7,8) \cdot 3 = 4,48 \cdot 10^{-3} \text{ кг},$$

де $S_{\text{пл}}$, $S_{\text{пр}}$ – площа поперечного перерізу плашок і призми індуктора ДПР

$$S_{\text{пл}} = p \cdot b_{\text{і}} \cdot h_{\text{і}} = 3 \cdot 7,87 \cdot 5,81 \cdot 10^{-6} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{пр}} = \frac{\pi}{4} [(D_{\text{і}} - 2h_{\text{і}})^2 - d_{\text{в2}}^2] = \frac{\pi}{4} [(23 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 5,81 \cdot 10^{-3})^2 - (7 \cdot 10^{-3})^2] = 6,32 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

$$b_{\text{з}} = D_{\text{з}} \sin \left(\frac{\pi}{p \cdot m} \right) = 23 \cdot 10^{-3} \sin \left(\frac{\pi}{3 \cdot 3} \right) = 7,87 \text{ мм} – \text{ширина індуктора ДПР};$$

$D_{\text{і}} = 23 \text{ мм}$ – зовнішній діаметр індуктора ДПР;

$h_{\text{і}} = 5,81 \text{ мм}$ – висота полюса індуктора згідно рис.2.7 вибирається з врахуванням необхідної міцності біля валу;

$L_{\text{і}} = 3 \text{ мм}$ – товщина індуктора ДПР;

					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
67						67
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



$d_{B2} = 7$ мм – внутрішній діаметр магніту ДПР або валу.

2.6.7. Момент інерції індуктора ДПР

$$J_i = \frac{G_i}{8} \cdot (D_i^2 + d_{B2}^2) = \frac{4,48 \cdot 10^{-3}}{8} \cdot \left[(23 \cdot 10^{-3})^2 + (7 \cdot 10^{-3})^2 \right] = 3,24 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

2.6.8. Сумарний момент інерції обертових частин

$$J = J_m + J_b + J_i = 1,516 \cdot 10^{-5} + 2,18 \cdot 10^{-8} + 3,24 \cdot 10^{-7} = 1,57 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

2.6.9. Фактичне значення постійної часу двигуна визначається по наступному вираженню

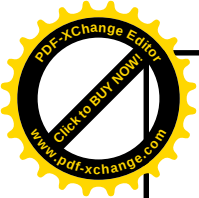
$$T = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{\Pi}} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{2H} \cdot k_{M1}} = \frac{1,352 \cdot 10^{-6} \cdot 570,5}{47,9 \cdot 10^{-3} \cdot 8,124} = 6,32 \text{ мс}.$$

Ця величина практично збігається зі значенням наближеної постійної часу двигуна, обчисленої по формулі (2.7), що дорівнює 7,11 мс.

					141. 4361. БР. ПЗ. Р2	Лист
68						68
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



					141. 4361. БР. ПЗ. РЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис		Розробка системи керування БДПС	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Лисогор П.О.							
Керівник	Александровський						69	13
Консульт.						ННІАЕ НУК		
Н. контр.								
В.о. зав. каф.	Обрубов А.В.							



3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БДПС

3.1. Опис роботи схеми БДПС з регулятором частоти обертання

БДПС, структурна схема якого приведена на рис.1.3в, складається з двох функціональних частин: силовій частини і блоку керування БК. Схема електрична принципова силовій частини показана на рис.3.1. До неї входять двигун постійного струму ДПС, датчик положення ротора ДПР, транзисторний комутатор К, що включає в себе, транзисторні ключі, які виконані на польових транзисторах $VT1...VT3$, через які енергія передається від зовнішнього джерела до обмоток двигуна постійного струму ДПС, і формувач керуючих імпульсів ФКІ. Усі перераховані елементи розміщені безпосередньо в корпусі БДПС. На рис.3.2. представлена принципова схема блока керування БДПС. У неї входять: широтно-імпульсний модулятор ШІМ, що включає в себе генератор трикутної напруги Г і компаратор КМ1, перетворювач частота – напруга ПЧН, регулятор Р, які утворюють негативний зворотний зв'язок по швидкості. Згідно з технічним завданням з метою обмеження струму реверс БДПС повинен здійснюватися при нульовій швидкості обертання індуктора ДПС. Для виконання цієї умови передбачений блок забезпечення реверсу БЗР, який підключає відповідні групи датчиків Холу. БЗР включає датчик нульової швидкості Д0, ключ КЛ, компаратор КМ2 і тригера Т. Схема одержує необхідну двополярну напругу ($\pm 12V$) от блока живлення БЖ. Перетворювач ПЧН для здобуття необхідного коефіцієнта перетворення отримує живлення мережі $U_{dc} = +24 V$.

Сигнал у вигляді імпульсів частотою рівній частоті обертання ротора з одного з датчиків Холу подається на вхід перетворювача ПЧН (ДА3), з виходу якого сигнал $u_{f/u}$, пропорційний швидкості обертання ДПС поступає на вхід регулятора Р, на інший вхід якого подається задавальна напруга u_z . Модульовані за шириною імпульси $u_{шім}$ створюються за допомогою компаратора КМ1 (ДА1.2), який вирівнює трикутну напругу u_{Γ} , що

					141. 4361. БР. ПЗ. РЗ	Лист
						70
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

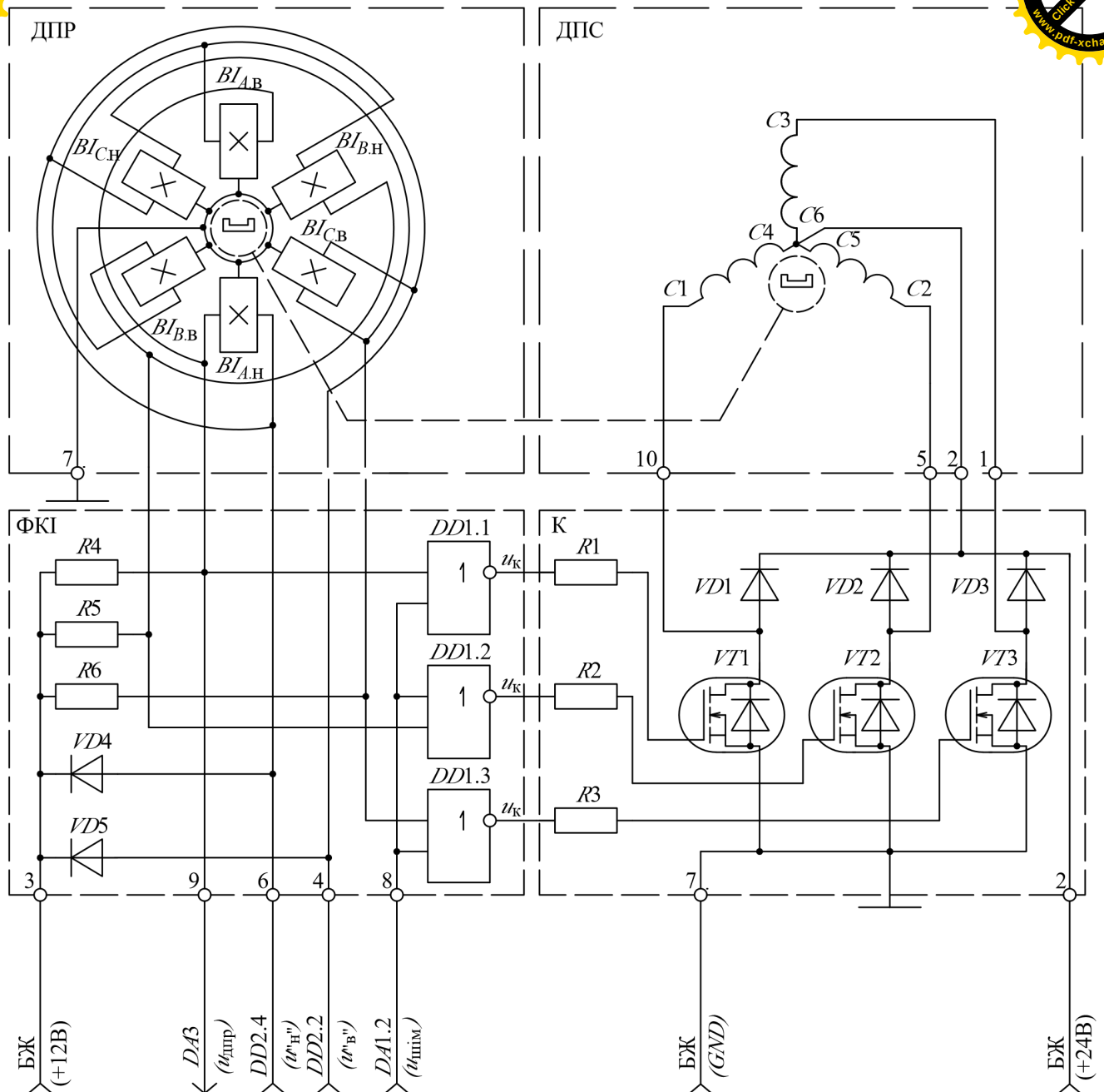


Рис.3.1. Схема електрична принципова БДПС. Силова частина

$DD1$ - К561ЛЕ5; $VD4, VD5$ - КД522Б; $VT1...VT3$ - BSS295; $R1...R6$ - МЛТ - 0,125 200 Ом; $VD1...VD3$ - КД243В; BI_A, BI_B, BI_C - А3245

надходить на позитивний вхід, з напругою регулятора $u_{рег}$, що поступає на негативний вхід з каналу зворотного зв'язку по швидкості (ПЧН, Р). Коли напруга $u_{рег}$ більша за напругу $u_{г}$ (рис.3.3), на виході компаратора КМ1 ($DA1.2$) має бути низький рівень $u_{шім}$. Коли напруга $u_{рег}$ стає меншою за $u_{г}$, компаратор $DA1.2$ переключасться на високий рівень [7]. Напруга $u_{г}$, прикладена до входу компаратора $DA1.2$, викликає на його виході

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

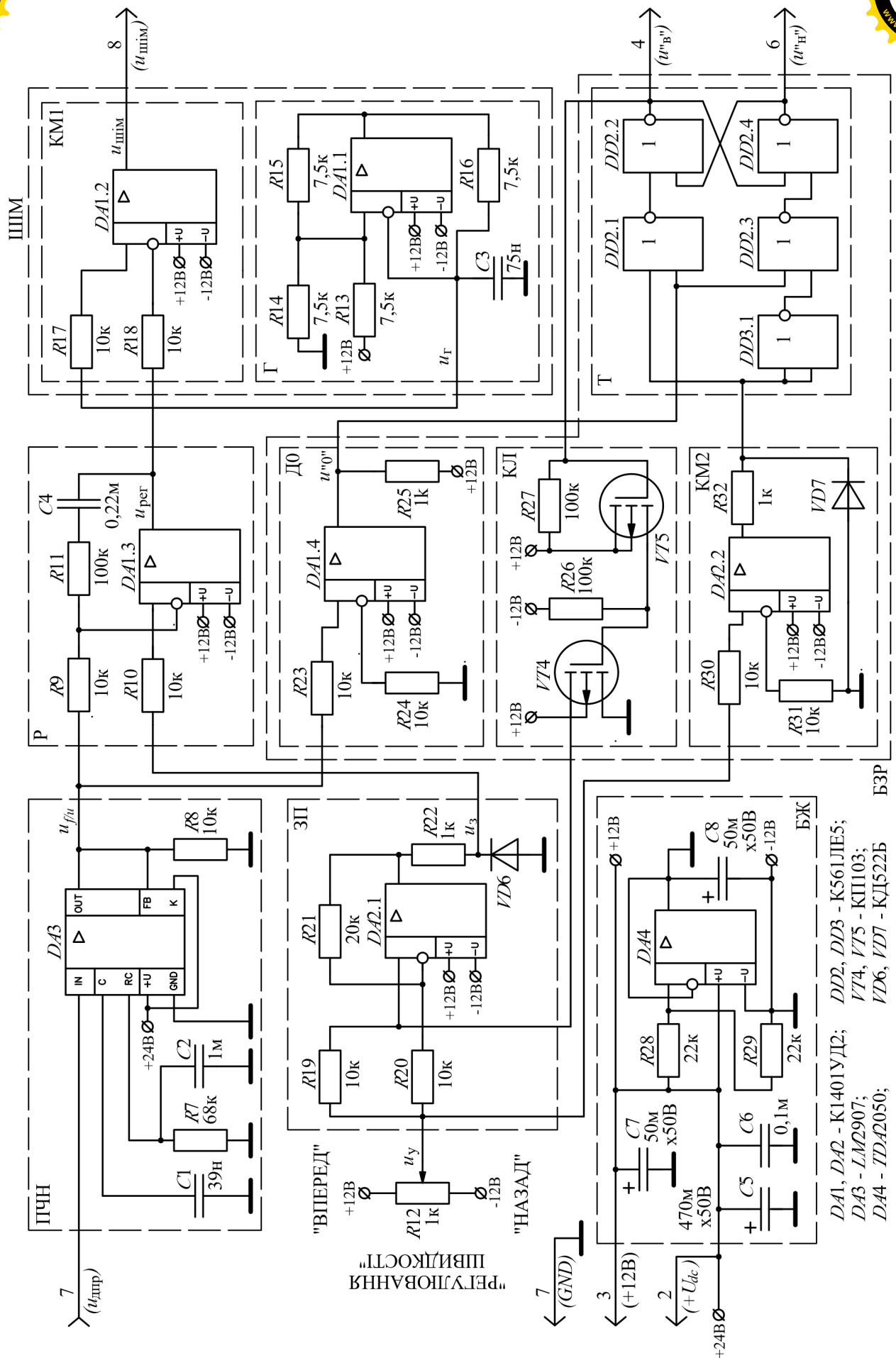
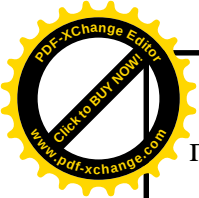


Рис.3.2. Схема електрична принципова блока керування БДПС



періодичну послідовність прямокутних імпульсів $u_{\text{шім}}$, ширина залежить від рівня $u_{\text{рег}}$. Генератор Г реалізований на першому (DA1.1) з чотирьох операційних підсилювачів мікросхеми K1401УД2. Частота коливань генерованої ним напруги $u_{\text{Г}}$ задає частоту перетворення. Резистори R13, R14, R15 утворюють ланцюг позитивного зворотного зв'язку, завдяки якому підсилювач працює як тригер Шмітта. Елементи інерційного негативного зворотного зв'язку R16, C3 задають частоту коливань. Припустимо, що конденсатор C3 розряджено і на виході DA1.1 високий рівень напруги, близький до напруги $U_{\text{ж}}$. Подільник R13, R14 задає рівень сталої складової напруги на неінвертувальному вході мікросхеми DA1.1. При R13 = R14 він дорівнює $U_{\text{ж}}/2$. При високій напрузі на виході на неінвертувальному вході напруга трохи більше за $U_{\text{ж}}/2$. Конденсатор C3 повільно заряджається. Як тільки напруга на конденсаторі C3 перевищить напругу на неінвертувальному вході, DA1.1. різко переключиться на низький рівень. Конденсатор C3 почне повільно розряджатися через резистор R16. На неінвертувальному вході при переключенні DA1.1 напруга знизиться до рівня, трохи меншого за $U_{\text{ж}}/2$. При досягненні напругою на конденсаторі того ж рівня DA1.1. знову переключиться на високий рівень і далі процеси будуть періодично повторюватися. На виході DA1.1 при цьому напруга буде прямокутної форми, а на конденсаторі C3 – близька до трикутної $u_{\text{Г}}$. Напруга $u_{\text{шім}}$ у формі інвертованих прямокутних імпульсів з виходу компаратора DA1.2 подається на входи елементів DD1.1...DD1.3 формувача керуючих імпульсів ФКІ, на другий вхід яких надходять сигнали $u_{\text{дпр}}$ (форма сигналу представлена на рис.2.10) з відповідних елементів ДПР ВІ (датчиків Холу).

ФКІ реалізований на логічній мікросхемі K561ЛЕ5, що представляє собою чотири елементи ІЛИ-НЕ (DD1.1...DD1.3) Позитивний імпульс ($U_{\text{„1”}}$), необхідний для відкриття ключів VT, з'являється на виході елементів ФКІ, коли на обох входах відповідних елементів будуть сигнали низького рівня ($U_{\text{„0”}}$). Керуюча напруга $u_{\text{к}}$ надходить на відповідні транзисторні

					141. 4361. БР. ПЗ. РЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		73

ключі $VT1...VT3$ в силову частину схеми (рис.3.1).

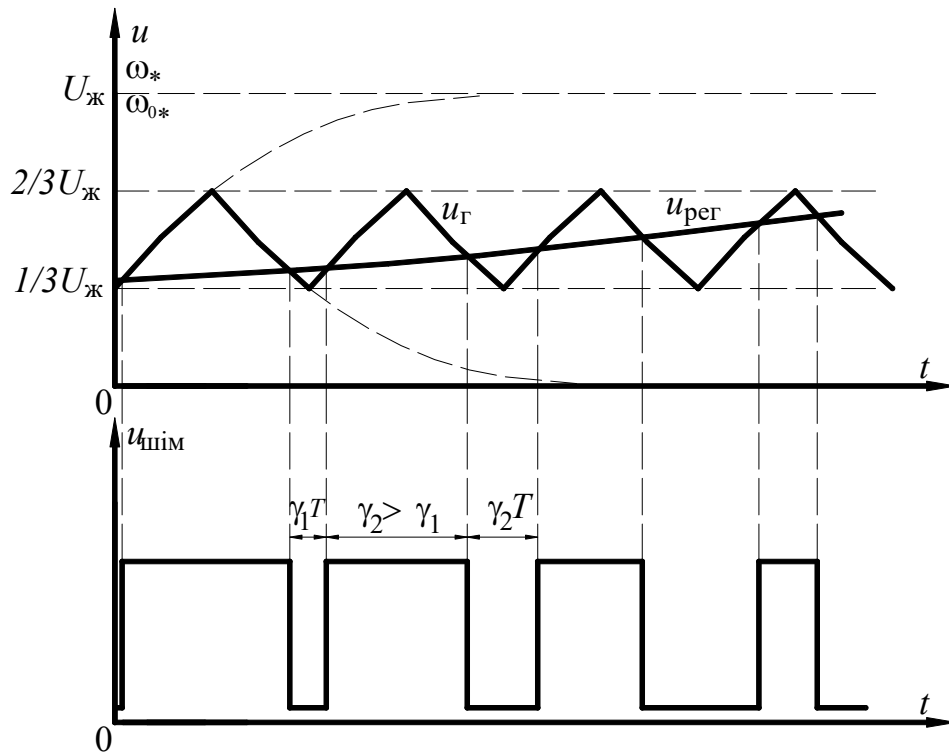
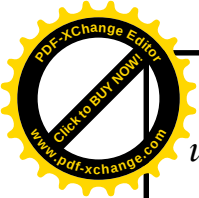


Рис.3.3. Часові діаграми роботи ШІМ

Регулювання швидкості обертання і реверс БДПС здійснюється за допомогою органу управління $R12$, середнє положення якого відповідає режиму «стоп». При зміні знаку напруги управління u_y відбувається перемикання компаратора КМ2 ($DA2.2$), вихід якого сполучений з одним з входів тригера Т ($DD2$, $DD3$). Проте тригер Т не перекинеється до тих пір, поки швидкість обертання ДПС не стане рівною нулю ($u_{fu} = 0$), що відповідає сигналу $u_{\sim 0}$ низького рівня на виході датчика нульової швидкості Д0 ($DA1.4$), на вхід якого подається сигнал u_{fu} пропорційний швидкості обертання індуктора ДПС з перетворювача ПЧН ($DA3$). Сигнал $u_{\sim 0}$ з датчика Д0 поступає на другий вхід тригера Т. В результаті, тригер Т міняє свій стан, що приводить до спрацювання ключа КЛ, реалізованого на польових транзисторах $VT4$, $VT5$. Для того, щоб задавальна напруга u_z завжди мала позитивний знак, передбачений задавальний підсилювач ЗП ($DA2.1$), який управляється ключем КЛ. Залежно від напрямку обертання ключ КЛ переводить підсилювач $DA2.1$ в інвертувальний режим чи ні. Таким чином на відповідному виході тригера Т з'являється напруга



$u_{\text{в}}$ або $u_{\text{н}}$ (+12В), що поступає на відповідну групу датчиків Холу. відбувається реверс БДПС.

3.2. Визначення параметрів елементів БК

3.2.1. Розрахуємо параметри елементів генератора Г. Приймаємо, що ширина зони переключення $DA1.1$ становить $1/3$ від перепаду напруги на його виході в режимі компаратора ($U_{\text{н}}$ - $U_{\text{о}}$). Тоді період коливань $T_{\text{п}} = 2\tau \cdot \ln 2$, де $\tau = C3 \cdot R14$ – стала часу [7].

Вихідна напруга $u_{\text{г}}$ симетрична відносно половинного рівня напруги $U_{\text{ж}}$. Тому опори подільника $R13, R14$

$$R13 = R14 = \frac{U_{\text{ж}}}{2I_{\text{д}}} = \frac{12}{2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 7,5 \text{ кОм},$$

де $U_{\text{ж}} = 12 \text{ В}$ – напруга живлення;

$I_{\text{д}} = 500 \cdot I_{\text{вх}} = 400 \cdot 2 \cdot 10^{-9} = 0,8 \text{ мА}$ – приймаємо струм подільника;

$I_{\text{вх}} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ – вхідний струм мікросхеми К1401УД2Б.

На неінвертувальний вхід $DA1.1$ через резистор $R15$ передається $1/3$ від перепаду вихідної напруги, тому $R15 = R14 = R13 = 7,5 \text{ кОм}$.

3.2.2. Задаємося $R16 = R15$, знаходимо значення частотозадавальної ємності $C3$

$$C3 = \frac{1}{2f_{\text{п}} \cdot R16 \cdot \ln 2} = \frac{1}{2 \cdot 1250 \cdot 7,5 \cdot 10^3 \ln 2} = 76,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ф},$$

де $f_{\text{п}} = 1,25 \text{ кГц}$ – вибрана частота перетворення (п.2.2.42).

Приймаємо $C3 = 75 \text{ нФ}$.

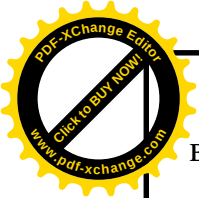
3.2.3. Уточняємо значення $R16$

$$R16 = \frac{1}{2f_{\text{п}} \cdot C3 \cdot \ln 2} = \frac{1}{2 \cdot 1250 \cdot 75 \cdot 10^{-9} \ln 2} = 7,69 \text{ кОм}.$$

Приймаємо $R16 = 7,5 \text{ кОм}$.

3.2.4. Перетворювач ПЧН є спеціалізованою мікросхемою $LM2907$, деякі елементи типової схеми включення якої вимагають розрахунку. Опір $R7$ (рис.3.2)

					141. 4361. БР. ПЗ. РЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		75



визначимо по відомому вихідному струму [12]

$$R7 = \frac{U_{dc}}{2I_7} = \frac{24}{2 \cdot 180 \cdot 10^{-3}} = 66,7 \text{ кОм},$$

де $I_7 = I_{out} = 180 \text{ мкА}$ – типове значення вихідного струму (ніжка 3 DA3).

Приймаємо $R7 = 68 \text{ кОм}$.

3.2.5. Перерахуємо значення вихідного струму

$$I_7 = \frac{U_{dc}}{2R7} = \frac{24}{2 \cdot 68 \cdot 10^3} = 176,5 \text{ мкА}.$$

3.2.6 Конденсатор C1 знайдемо з формулі [12]

$$C1 = \frac{I_7}{f_{\max} \cdot U_{dc}} = \frac{176,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^3 \cdot 24} = 36,8 \cdot 10^{-9} = 39 \text{ нФ}.$$

де $f_{\max} = 2 \text{ кГц}$ – максимальне значення вхідної частоти набуває з деяким запасом.

3.2.7 Перерахуємо частоту

$$f_{\max} = \frac{I_7}{C1 \cdot U_{cc}} = \frac{176,5 \cdot 10^{-6}}{39 \cdot 10^{-9} \cdot 24} = 1885 \text{ Гц}.$$

3.2.8 Коефіцієнт перетворювання

$$K_{\ddot{r} \rightarrow i} = \frac{2f_{\max}}{U_{cc}} = \frac{2 \cdot 1885}{24} = 15,71 \text{ Гц/В}.$$

3.2.9 Напруга відповідна номінальній частоті

$$U_{f/u} = \frac{f_n}{K_{\text{пчн}}} = \frac{112,5}{15,71} = 7,16 \text{ В},$$

що є прийнятною величиною для досягнення потрібного діапазону регулювання.

Параметри інших елементів БК не роблять істотного впливу на регулювальні характеристики пристрою і тому не жадають попереднього розрахунку.

3.3. Розрахунок регулювальних і механічних характеристик БДПС

Регулювальні характеристики – залежності частоти обертання двигуна від зміни керуючого сигналу в системі керування.

					141. 4361. БР. ПЗ. РЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		76

На рис.3.4 представлені регулювальні характеристики $\omega = f(u_y)$ БДПС у функції керуючого сигналу u в відносних одиницях

$$u_y = \frac{U_y}{U_{y, \max}}. \quad (3.1.)$$

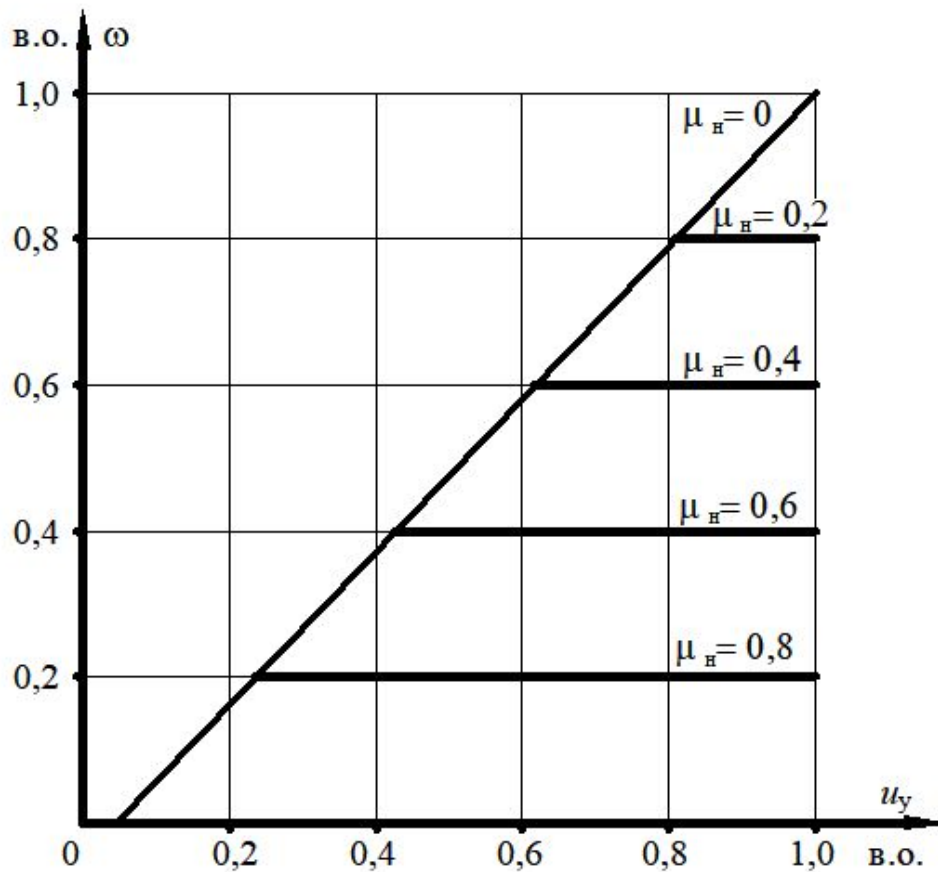


Рис.3.4. Регулювальна характеристика БДПС

Робочі точки відповідають рівнянню лінії включення релейного елемента

$$\sigma_0 = u_y - (1 - \sigma_0) \cdot \omega, \quad (3.2.)$$

де σ_0 – зона нечутливості реле.

Діапазон можливої зміни швидкостей визначається з рівняння натуральної моментної характеристики: $\omega = 1 - \mu_n$, унаслідок чого можливе регулювання в області $0 < \omega < 1 - \mu_n$. [8].

Ділянки насичення на регулювальних характеристиках пояснюються тим, що при даному μ_n при будь-яких керуючих сигналах неможливо досягнення швидкості $\omega > 1 - \mu_n$, тобто відповідної точки натуральної

характеристики.

Для побудови механічних характеристик з врахуванням регулювальника швидкості скористаємося наступними рівняннями машини постійного струму:

$$M_d = C_m \Phi I_d, \quad (3.3)$$

$$n = n_z = \text{const при } U_p < U_{\max}, \quad (3.4)$$

$$n = \frac{U - I_d R_c}{C_e \Phi} \text{ при } U_p > U_{\max}, \quad (3.5)$$

За наявності в каналі регулювання інтегральної ланки DA1.3 (рис.3.2), статична помилка по швидкості дорівнюватиме нулю до тих пір, поки напруга регулювання менше максимальної напруги живлення $U_p < U_{\max}$. Тому при зміні моменту навантаження швидкість залишається постійною і рівною заданою. При $U_p > U_{\max}$ швидкість мінятиметься по натуральній механічній характеристиці.

Для розрахунку і побудови механічних характеристик (рис.3.5)

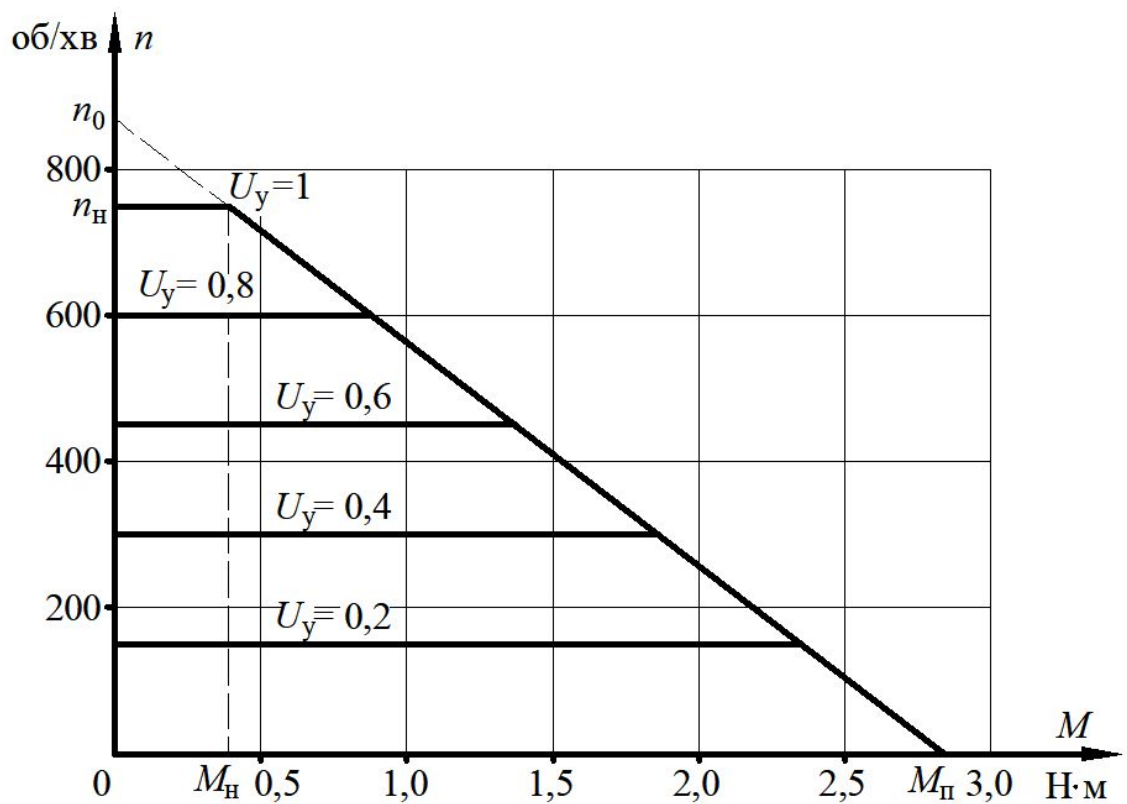
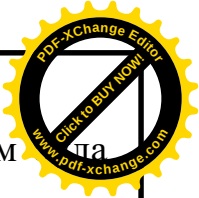
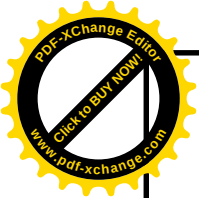


Рис.3.5. Механічні характеристики БДПС з регулятором частоти обертання



Всі необхідні дані для розрахунку узяті з розділу Р2. Алгоритм написана програма на мові програмування *Turbo Pascal* (додаток В). розрахунку полягає в наступному. Задаємося моментом навантаження M . З вираження (3.3) знаходимо струм двигуна I_d . З вираження (3.5) знаходимо напругу U . Порівнюємо його з максимальною напругою живлення (перевіряємо умову $U_p < U_{\max}$) і залежно від результату знаходимо швидкість n по вираженню (3.4) або (3.5).

3.4. Електромеханічні перехідні процеси при пуску БДПС

3.4.1. Дослідження перехідних процесів при непостійності частоти обертання БДПС відрізняється великою складністю. Це пояснюється нелінійністю вихідних рівнянь і відсутністю тимчасової періодичності перемикання секцій. Навіть на деякій ділянці лише усередині міжкомутаційного періоду, система рівнянь, що описує процес розгону за умови постійності структури цих рівнянь не дозволяє отримати строге аналітичне вираження [1]. Дійсно, хай процес розглядається усередині міжкомутаційного періоду α_k для кута повороту ротора $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_k$. На цій ділянці процес протікання струму секції, що відключається, закінчився і рівняння динаміки можуть бути представлені у вигляді:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_n, \quad (3.6)$$

$$M_d = C_m \Phi I_d \cos\left(\alpha - \frac{\alpha_k}{2}\right), \quad (3.7)$$

$$L_s \frac{dI_d}{dt} + I_d R = U - C_e \Phi \omega \cos\left(\alpha - \frac{\alpha_k}{2}\right), \quad (3.8)$$

$$\alpha = p \int \omega dt. \quad (3.9)$$

Як видимий, навіть в нутрії одного інтервалу система нелінійна і її строге рішення неможливе. Тому для подальшого аналітичного вирішення вводимо спрощення, яке полягає в усереднюванні змінного коефіцієнта

					141. 4361. БР. ПЗ. РЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		79

$\cos\left(\alpha - \frac{\alpha_k}{2}\right)$. На інтервалі $0 \leq \alpha \leq \alpha_k$ для величин, що найчастіше зустрічаються $\alpha_k \leq 2\pi/3$ цей коефіцієнт змінюється відносно мало, і його середнє значення буде

$$k(\alpha_k) = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_k}{2}\right)}{\frac{\alpha_k}{2}} = \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{2 \cdot 3}\right)}{\frac{2\pi}{2 \cdot 3}} = 0,827.$$

Таким чином, магнітний потік Φ і отже твори $C_m\Phi$ і $C_e\Phi$ у рівняннях 3.3, 3.5, 3.7, 3.8 приймаємо постійними величинами і рівними середньому значенню за міжкомутаційний період

$$C_m\Phi = \frac{M_{дн}}{I_{дн}k(\alpha_k)} = \frac{38,1 \cdot 10^{-3}}{0,177 \cdot 0,827} = 0,26 \text{ Вб};$$

$$C_e\Phi = \frac{U_{\max} - I_{дн}R}{n_H k(\alpha_k)} = \frac{26,4 - 0,177 \cdot 17,47}{753 \cdot 0,827} = 0,037 \text{ Вб}.$$

Тоді перетворена система рівнянь 3.6...3.9 з врахуванням прийнятих допущень набере вигляду

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_m\Phi k(\alpha_k) I_{д} - M_H); \quad (3.10)$$

$$\frac{dI_{д}}{dt} = \frac{U - C_e\Phi k(\alpha_k)\omega - I_{д}R}{L_s}. \quad (3.11)$$

3.4.2. Каналом регулювання є послідовне з'єднання ланок (рис.3.2) ПЧН, Р, ШІМ, К. Коефіцієнт перетворення ПЧН згідно п.3.3.9 $K_{пчн} = 15,71 \text{ В/Гц} = 0,01 \text{ В/(об/хв)}$. Регулювальник Р описується наступною передавальною функцією

$$K_p = \frac{\Delta u_p}{\Delta u_{f/u}} = -\frac{R11}{R9} - \frac{1}{C4R9p} = -\frac{100 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} - \frac{1}{0,22 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 p} = -10 - 450 \frac{1}{p}.$$

Коефіцієнт передачі ланок ШІМ, К складає

$$K_{шім} = \frac{U_H}{u_p} \approx \frac{24}{8} \approx 3.$$

В результаті рівняння каналу регулювання прийме вигляд

$$U = (n_n \cdot K_{пчн} - u_3) K_p \cdot K_{шім} = (n_n - n_3) K_{пчн} \cdot K_p \cdot K_{шім} = \\ = 0,01 \cdot 3 \cdot (10 + 450/p) \Delta n = (0,3 + 13,5/p) \Delta n. \quad (3.12)$$

Програма розрахунку перехідних процесів по рівняннях 3.10...3.12 на мові *Turbo Pascal* при пуску БДПС представлена в додатку Г, графіки на рис.3.6.

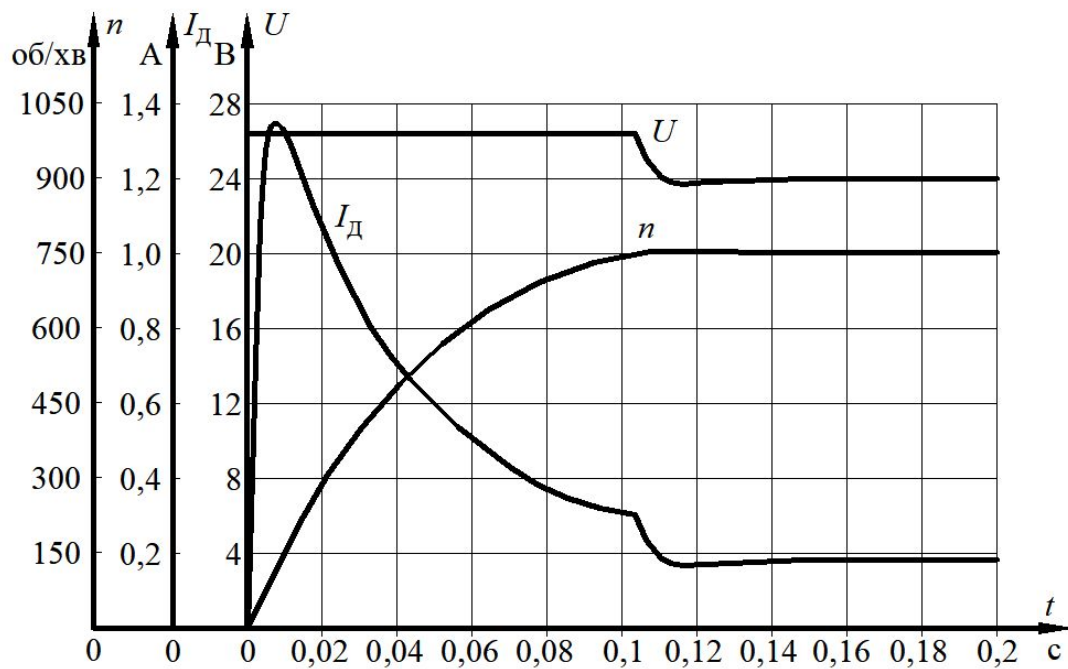
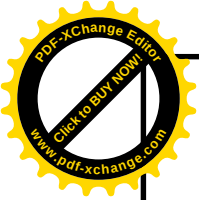


Рис.3.6. Перехідні процеси при пуску БДПС

Як видно з отриманих графіків, БДПС розганяється до номінальної частоти обертання за час, рівний 0,15 с, що є добрим результатом для даної системи регулювання.



					141. 4361. БР. ПЗ. Р4				
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Охорона праці при експлуатації СЕЕС	Лім.	Лист	Листів	
Розроб.		Лисогор П.О.							
Керівник		Александровський С					82	8	
Консульт.						ННІАЕ НУК			
Н. контр.									
В.о. зав. каф.		Обрубов А.В.							



4. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СЕЕС

Вступ

Під визначенням "охорона праці" розуміється система правових, соціально - економічних, організаційно - технічних, санітарно - гігієнічних, лікувально - профілактичних мір і засобів, спрямованих на збільшення безпеки праці, попередження травматизму і професійних захворювань, отруєнь, пожеж і вибухів на виробництві.

Охорона праці в Україні забезпечується законом "Про охорону праці", прийнятим 14 жовтня 1992 року Верховною Радою України, а також відповідними положеннями і нормами. Недотримання норм і вимог по охороні праці, а також специфіка деяких видів виробництв приводять до виникнення небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Небезпечним виробничим фактором називається такий вплив на працюючого, котрий у визначених умовах приведе до травм або іншому раптовому погіршенню здоров'я. Результат впливу небезпечного виробничого фактора на людину називається нещасним випадком. До таких відносяться ураження електричним струмом, механічна травма внаслідок несправності устаткування, отруєння, опіки і т.д.

Вплив шкідливого виробничого фактора приводить до професійних захворювань, зниженню працездатності. До шкідливих виробничих факторів відносяться шуми, вібрація, шкідливі випромінювання, гази і т.д.

У залежності від можливих видів небезпечних або шкідливих впливів на людину, проектоване устаткування споряджаються захисними пристроями і пристосуваннями, що забезпечують безпечну трудову діяльність працівника.

Судно по своїй специфіці є джерелом численних небезпек і шкідливостей. Тому до охорони праці на судні пред'являються підвищені вимоги, регламентовані відповідними документами.

					141. 2367ст. БР. ПЗ. Р4	Лист
						83
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що виникають при роботі СЕЕС

Суднова електростанція розташовується у машинному відділенні судна. Тут знаходяться основні генераторні агрегати й основні обслуговуючі їх пристрої, що за допомогою кабельних трас з'єднуються з ГРЩ. Далі за допомогою фідерів ГРЩ з'єднується з місцевими розподільними щитами, розташованими, по необхідності, у будь-якому відсіку або місці судна.

Крім того, в окремому приміщенні розташовується аварійний дизель - генератор, що має свій аварійний розподільний щит.

Для машинного відділення характерна наявність таких шкідливих виробничих факторів, як шуми і вібрація внаслідок руху деталей і вузлів механізмів, вихлопу газів і т.п., загазованість і запиленість повітря через наявність парів масел, палива через замкнутість приміщення, недостатня освітленість, тому що машинне відділення знаходиться усередині корпусу судна і містить велику кількість устаткування. Небезпеку у машинному відділенні можуть представляти балони пускового повітря, що знаходяться під надлишковим тиском, відкриті частини механізмів, що рухаються, струмопровідні поверхні, що контактують з корпусами генераторів, паливні системи та резервуари і т.д.

Для ЦПК характерні шуми, видавані струмоведучими частинами ГРЩ, кабелями. Небезпеку представляє висока напруга на шинах, можливість вибуху устаткування ГРЩ при впливі ударних струмових навантажень. Безпечним вважається: для перемінного струму частотою 50 Гц струм 10 мА, для постійного струму - 60 мА. У випадку пробоя ізоляції на корпус або коротке замикання дотик до корпусу цього устаткування вважається безпечним при наявності захисного заземлення.

Приміщення машинного відділення піддається впливу хвильової хитавиці, різних кренів і диферентів. Повітря в ньому насичено вологою, частками солі, різними парами. Також негативний психологічний вплив робить обмеженість і замкнутість простору суднових приміщень.

					141. 2367ст. БР. ПЗ. Р4	Лист
						84
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



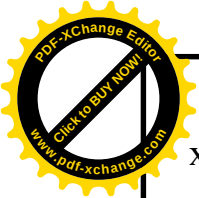
4.2. Заходи щодо зниження впливу на людей небезпечних і шкідливих факторів на судні

Зниження імовірності впливу на людину різних небезпечних і шкідливих факторів виробляється шляхом проведення наступних організаційно - технічних заходів:

- 1) установка звукоізолюючих перегородок, пристроїв, що амортизують;
- 2) установка такої кількості світильників, що забезпечувало б необхідну освітленість робочих місць, застосування місцевого висвітлення;
- 3) вентиляція і фільтрація повітря приміщень;
- 4) надійне закріплення устаткування;
- 5) установка захисних кожухів на обертові частини механізмів;
- 6) ізоляція струмоведучих поверхонь, до яких можливий дотик людини, їх-не огороження;
- 7) забезпечення динамічної міцності електричних апаратів, деталей машин і механізмів, що обертаються , а також пристроїв, що знаходяться під тиском;
- 8) застосування індивідуальних фільтруючих і звукоізолюючих засобів;
- 9) навчання правилам експлуатації і техніки безпеки обслуговуючого персоналу;
- 10) проведення своєчасних оглядів і ремонтів устаткування;
- 11) облаштованість місць психологічного відпочинку членів команди.

4.3. Розробка заходів щодо забезпечення електро - і вибухобезпеки устаткування СЕЕС

Електричний опір людського організму при чистій і сухій поверхні шкіри вимірюється десятками кОм. При вологій або ушкодженій шкірі воно зменшується до декількох сотень Ом. Опір тіла людини залежить від наступних факторів: тривалості впливу електричного струму; площі контакту зі струмоведучими частинами; величини прикладеної напруги [4]. У зв'язку з цим існують наступні за-



ходи щодо підвищення електробезпеки суднового електроустаткування:

- 1) застосування низької напруги;
- 2) поділ електричних ланцюгів високої і низької напруги;
- 3) контроль і профілактика ушкоджень ізоляції. Застосування спеціального устаткування (мегомметрів) для регулярного виміру опору ізоляції;
- 4) огороження, блокування, розташування струмоведучих частин у недо-ступних місцях;
- 5) захисне відключення електроустаткування при виникненні вірогідності поразки людини електричним струмом;
- 6) використання інструмента з ізольованими ручками, покриття полів електроізоляційними килимками й ін.;
- 7) установка попереджувачих і забороняючих табличок, перешкоджання доступу сторонніх у приміщення з небезпекою ураження електрострумом.

Підвищена увага при проектуванні устаткування приділяється його пожежно- і вибухобезпеки, особливо це стосується устаткування танкерів, тому що за-палення або вибух якого-небудь пристрою може привести до загоряння або де-тонації перевезеного вантажу (нафта, нафтопродукти). При цьому причинами пожежі або вибуху можуть бути: запалення ізоляції струмоведучих частин при перевантаженнях; дугові розряди, іскріння; необережне поводження з вогнем; запалення палих матеріалів при контакті з киснем; порушення цілісності при-строїв, що знаходяться під надлишковим тиском та ін.

Тому на таких судах проводяться заходи щодо підвищення пожежно- і ви-бухобезпеки устаткування:

- 1) профілактика ізоляції електроустаткування, відключення його при пере-вантаженнях;
- 2) вентиляція повітря з метою видалення парів палива, масел і т.п.;
- 3) обережне поводження з вогнем, паливними матеріалами;
- 4) застосування устаткування з міцними корпусами морського виконання;
- 5) розподіл судна вогнетривкими перебірками, відділення вантажних тан-ків від пожежно- і вибухонебезпечних приміщень декількома безпечними.

					141. 2367ст. БР. ПЗ. Р4	Лист
						86
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



4.4. Розрахунок рівня шуму в машинному відділенні

З фізіологічної точки зору шум визначається як звуковий процес, що утрудняє сприйняття розмовної мови і шкідливо впливає на здоров'я людей. Шум - це складні гармонійні коливання різної частоти і сили при їхньому безладному сполученні. При тривалому впливі він викликає шкідливі зміни в нервовій системі, серцево - судинних органах, органах травлення. Підвищується кров'яний тиск, прискорюється пульс і подих, знижується слух. З'являється головний біль, запаморочення, безсоння, ослаблення уваги, розлад центральної нервової системи, знижується працездатність. Тому, природно, виникає необхідність боротьби із шумом.

У машинному відділенні основним джерелом шуму є два дизель - генераторних агрегати. Рівень шумів від інших механізмів набагато нижче, тому в розрахунок не приймається.

4.4.1. Типова характеристика шуму дизеля приведена в таблиці 5.1.

Таблиця 4.1. Характеристика шуму дизеля 25ДГ

<i>F</i> , Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>L</i> , дБ	97	100	104	102	94	91	83	76

4.4.2. Загальний рівень шуму для одного дизеля дорівнює

$$L_{\text{общ}} = 10 \lg(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + 10^{0,1L_3} + 10^{0,1L_4} + 10^{0,1L_5} + 10^{0,1L_6} + 10^{0,1L_7} + 10^{0,1L_8}) = 10 \lg(10^{0,1 \cdot 97} + 10^{0,1 \cdot 100} + 10^{0,1 \cdot 104} + 10^{0,1 \cdot 102} + 10^{0,1 \cdot 94} + 10^{0,1 \cdot 91} + 10^{0,1 \cdot 83} + 10^{0,1 \cdot 76}) = 107,8 \text{ дБ.}$$

4.4.3. Визначимо рівень шуму на відстані від джерела. Оскільки ГРЩ знаходиться в машинному відділенні і біля нього постійно несеться вахта, доцільно визначити рівень шуму саме в цій точці. Спрощена схема розташування генераторних агрегатів показана на рис.4.1. Відстані від дизель-генераторів до ГРЩ різні і, відповідно, рівні $r_1 = 4,6 \text{ м}$, $r_2 = 7,0 \text{ м}$

$$L_r = L_{\text{общ}} - 20 \lg r - 8;$$

$$L_{r1} = L_{\text{общ1}} - 20 \lg r_1 - 8 = 107,8 - 20 \lg 4,6 - 8 = 86,52 \text{ дБ;}$$

$$L_{r2} = L_{\text{общ2}} - 20 \lg r_2 - 8 = 107,8 - 20 \lg 7,0 - 8 = 82,9 \text{ дБ.}$$

4.4.4. Знайдемо сумарний рівень шуму в обраній точці від двох джерел по формулі

$$L_r = L_{\text{max}} + \Delta L = 86,52 + 1,6 = 88,12 \text{ дБ,}$$

де $\Delta L = 1,6$ дБ – добавка, обумовлена [4];

L_{max} - найбільший рівень шуму.

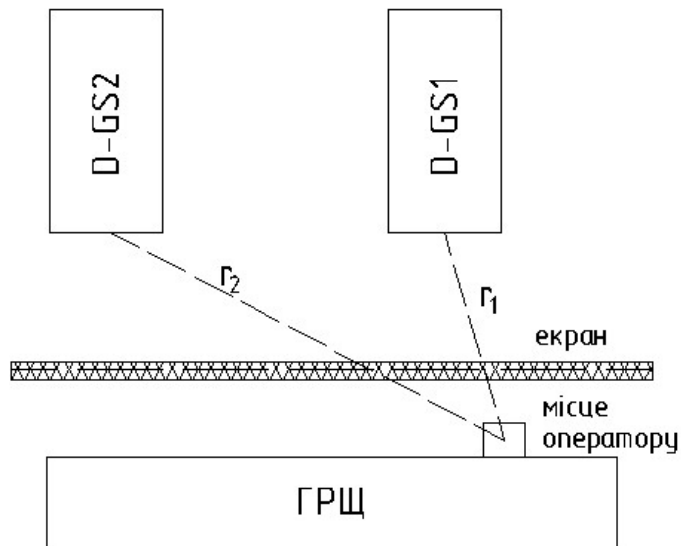


Рис.4.1. Спрощена схема розташування основних джерел шуму в машинному відділенні

4.4.5. Величина, на яку необхідно знизити рівень шуму, визначається по формулі

$$\Delta L_c = L_{\text{общ}} - L_{\text{доп}} + 8 = 88,12 - 80 + 8 = 16,12 \text{ дБ,}$$

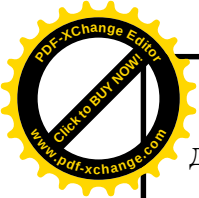
де $L_{\text{доп}} = 80$ дБ – припустимий санітарними нормами рівень шуму [13].

Зниження рівня шуму досягається установкою екрану на робочому місці.

4.4.6. Величина зниження шуму екраном визначається величиною коефіцієнта k_b .

Попередньо по таблиці 2 [4] вибираємо $k_b = 3$, при якому $\Delta L_c = 18$ дБ.

$$k_b = 0,05 \sqrt{f} \cdot \sqrt[4]{\frac{H^2 \left(\frac{l}{b}\right)^2}{1 + 4 \left(\frac{a}{H}\right)^2}} = 0,05 \cdot 15,8 \cdot \sqrt[4]{\frac{3^2 \left(\frac{5,5}{0,6}\right)^2}{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}} = 2,45,$$



де $f=250$ Гц – частота звуку;

$l=5,5$ м – довжина екрану;

$H=3$ м – висота екрану;

$b=0,6$ м – відстань від екрану до оператора;

$a=4$ м – відстань від екрану до джерела шуму.

4.4.7. Величина, на яку знизився рівень шуму при $k_b=2,45$ визначається методом інтерполяції

$$\Delta L_c = 15 + \left(\frac{18 - 15}{1} \right) \cdot 0,45 = 16,35 \text{ дБ.}$$

У результаті: величина рівня шуму, на яку його варто було б понизити, складає 16,12 дБ, а застосування запропонованого екрану знижує рівень шуму на 16,35 дБ. Отже, параметри екрану обрані правильно.

					141. 2367ст. БР. ПЗ. Р4	Лист
						89
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



ВИСНОВКИ ПО ДИПЛОМНІЙ РОБОТІ

У даній дипломній роботі був розроблений і розрахований безконтактний двигун постійного струму потужністю 3 Вт, 750 об/хв., призначений для роботи в системі зовнішнього спостереження підводного апарату, а також розроблена електрична схема регулювання і реверса двигуна. Розраховані робочі, механічні та регульовальні характеристики, перехідні процеси при пуску двигуна.

Проведений аналіз спроектованого безконтактного двигуна постійного струму показав переваги даного двигуна перед колекторним двигуном постійного струму тієї ж потужності:

- даний двигун має схему стабілізації по швидкості;
- відсутність щітково-колекторного вузла знижує втрати в двигуні, а також збільшує термін служби двигуна;
- використання розробленої схеми управління гарантує більш плавне регулювання частоти обертання двигуна і реверс при нульовій частоті обертання;
- відсутність електромеханічного датчика швидкості значно зменшує вагогабаритні показники двигуна і покращує динамічні характеристики;
- відсутність обмотки на роторі знижує собівартість двигуна, а також поліпшує його утилізацію;
- даний двигун доцільно використовувати в системах автоматичного управління, тому що даний двигун має жорсткі вихідні характеристики.

У результаті виконаної роботи можна зробити висновок про необхідність переважного використання у промисловості більш ефективних безконтактних двигунів, замість звичайних колекторних двигунів.



					141. 4361. БР. ПЗ. Д		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис		Додатки		
Розроб.	Лисогор П.О.						
Керівник	Александровський С.						
Консульт.							
Н. контр.							
В.о. зав. каф.	Обрубов А.В.				ННІАЕ НУК		
					Лім.	Лист	Листів
						91	11



ДОДАТОК А

Розрахунок реверсивної проникності постійного магніту,
виконаного зі сплаву ЮНДК18

А.1. Вихідні дані:

- залишкова індукція $B_r = 0,9$ Тл;
- коерцитивна сила $H_c = 55$ кА/м;
- координати екстремальної точки, що $B_d = 0,57$ Тл;
- відповідає максимальній енергії магніту $H_d = 34$ кА/м;
- магнітна постійна $\mu_0 = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

А.2. Розрахуємо допоміжні коефіцієнти, що визначають форму кривій розмагнічування:

$$\begin{aligned}q_b &= B_d / B_r = 0,57 / 0,9 = 0,633; \\d &= \mu_0 \cdot H_c / B_r = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 55 \cdot 10^3 / 0,9 = 0,077; \\c &= \mu_0 \cdot H_d / B_r = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 34 \cdot 10^3 / 0,9 = 0,047; \\f &= H_d / H_c = 34 \cdot 10^3 / 55 \cdot 10^3 = 0,618, \\k &= \frac{(q_b + c) \cdot (d + f - c) - d}{q_b + f - 1} = \\&= \frac{(0,633 + 0,047) \cdot (0,077 + 0,618 - 0,047) - 0,077}{0,633 + 0,618 - 1} = 1,447.\end{aligned}$$

А.3. Визначимо коерцитивну силу по намагніченості

$$jH_c = H_c \frac{1 - \frac{d}{k}}{1 - d} = 55 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 - \frac{0,077}{1,447}}{1 - 0,077} = 5,64 \cdot 10^4 \text{ А/м.}$$

А.4. У роботі [8] показано, що залежність реверсивної магнітної сприйнятливості k_r від напруженості магнітного поля H можна апроксимувати рівнянням

$$k_r = \frac{B_r}{\mu_0 jH_c} a \cdot b = \frac{0,9}{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 5,64 \cdot 10^4} 0,386 \cdot 0,98 = 4,811,$$



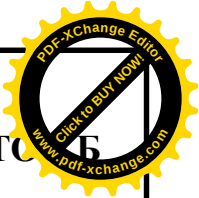
$$\text{де } a = 0,635 \left(\frac{k-1}{k} \right)^{0,423} = 0,635 \left(\frac{1,447-1}{1,447} \right)^{0,423} = 0,386;$$

$$b = 0,8 + h \cdot [0,289 + h \cdot (1,38 - 2,08h)] = 0,8 + 0,681 [0,289 + 0,681 \times (1,38 - 2,08 \cdot 0,681)] = 0,98;$$

$$h = k \frac{jH_c - H_d}{k \cdot jH_c - H_d} = 1,447 \frac{5,64 \cdot 10^4 - 3,4 \cdot 10^4}{1,447 \cdot 5,64 \cdot 10^4 - 3,4 \cdot 10^4} = 0,681.$$

А.5. У результаті визначимо абсолютну реверсивну проникність

$$\rho = \mu_0 \cdot \rho' = \mu_0 (1 + k_r) = 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 4,811) = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$



Залежності напруженості магнітного поля й індукції в повітряному зазорі від питомої провідності магніту, виконаного зі сплаву ЮНДК18

Б.1. Постійний магніт повинний забезпечувати необхідне значення індукції в повітряному зазорі ЕМ після впливу на нього максимально можливої подовжньої реакції (і, якщо це не обмовляється, після перебування у вільному від якоря стані), тобто повинний бути підвалина до розмагнічування якірним струмом (і у вільному стані). Це можливо в тому випадку, коли забезпечується визначене положення точки відходу робочої прямої повернення на кривій розмагнічування, тобто визначена стабілізація магніту. Магніт може бути стабілізований струмом якоря визначеної величини (струмом стабілізації) або у вільному стані від якоря. На визначеному етапі розрахунку необхідно переконатися в правильності вибору матеріалу магніту. Для цього необхідно мати залежності напруженості магнітного поля, що забезпечує необхідну стабілізацію магніту $H_{\text{ст}}$, й індукції в повітряному зазорі при стабілізації у вільному стані $B_{\delta\text{св}}$ від питомої провідності магніту g . Як показано в [1], знаючи параметри магніту (див. додаток А), а також питомі провідності розсіювання магніту, що знаходиться в якорі g_s та в вільному стані $g_{s,\text{св}}$ (знаходимо по табл.2 [1] $g_s = 1,9 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $g_{s,\text{св}} = 3,0 \cdot 10^{-6}$ Гн/м) можна одержати необхідні залежності $H_{\text{ст}} = f(g)$ для різних значень індукції в повітряному зазорі B_{δ} , (рис.Б.1) і $B_{\delta\text{св}} = f(g)$ для різних значень питомої провідності розсіювання $g_{s,\text{св}}$ при стабілізації у вільному стані (рис.Б.2.).

Б.2. При стабілізації магніту якірним струмом $H_{\text{ст}} = f(g)$

$$H_{\text{ст}} = H_1 + \sqrt{H_1^2 - H_2},$$

де

$$H_1 = \frac{g_0 + \rho}{2g\rho} \left(\frac{g_0 - \rho}{g_0} \cdot \frac{B_{\delta} g_0}{g} - \frac{B_r - \rho H_c}{a_b} \right);$$

					141. 4361. БР. ПЗ. Д	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		94

$$H_2 = \frac{(g_0 + \rho)^2}{g_0 \cdot \rho \cdot g^2} \left[\frac{(B_r - g_0 H_c)}{a_B} \cdot \frac{B_{\delta} g_0}{g} - \left(\frac{B_{\delta} g_0}{g} \right)^2 - \frac{B_r g_0 H_c}{a_B} \right];$$

$$a_{\hat{a}} = 2 \sqrt{\frac{B_r H_c}{(BH)_{\max}}} - \frac{B_r H_c}{(BH)_{\max}} = 2 \sqrt{\frac{0,9 \cdot 55 \cdot 10^3}{19,38 \cdot 10^3}} - \frac{0,9 \cdot 55 \cdot 10^3}{19,38 \cdot 10^3} = 0,642 -$$

– коефіцієнт опуклості кривої розмагнічування;

$g_0 = g_s + g = 1,9 \cdot 10^{-6} + 37,3 \cdot 10^{-6} = 39,2 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – питома провідність для повного потоку, що проходить через нейтральний перетин магніту.

Б.3 При стабілізації магніту в вільному стані $B_{\delta CB} = f(g)$

$$B_{\delta CB} = \frac{g}{g_0} \left(B_3 - \sqrt{B_{31}^2 - B_4} \right)$$

де

$$B_3 = \frac{B_r + g_{SCB} H_c}{2a_B} \cdot \frac{1 + \frac{\rho}{g_{SCB}}}{1 + \frac{\rho}{g_0}}; \quad B_4 = \frac{B_r H_c}{a_B} \cdot g_{SCB} \cdot \frac{1 + \frac{\rho}{g_{SCB}}}{1 + \frac{\rho}{g_0}}.$$

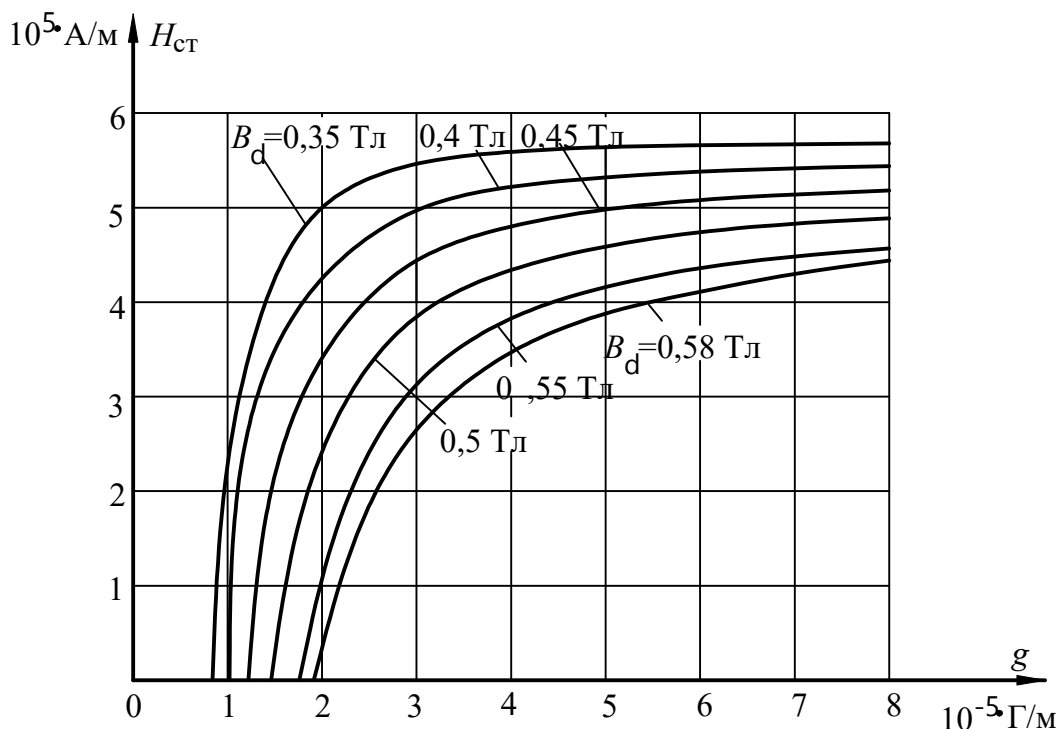


Рис.Б.1. Залежність напруженості магнітного поля, що забезпечує необхідну стабілізацію магніту від питомої провідності магнітного сплаву ЮНДК18

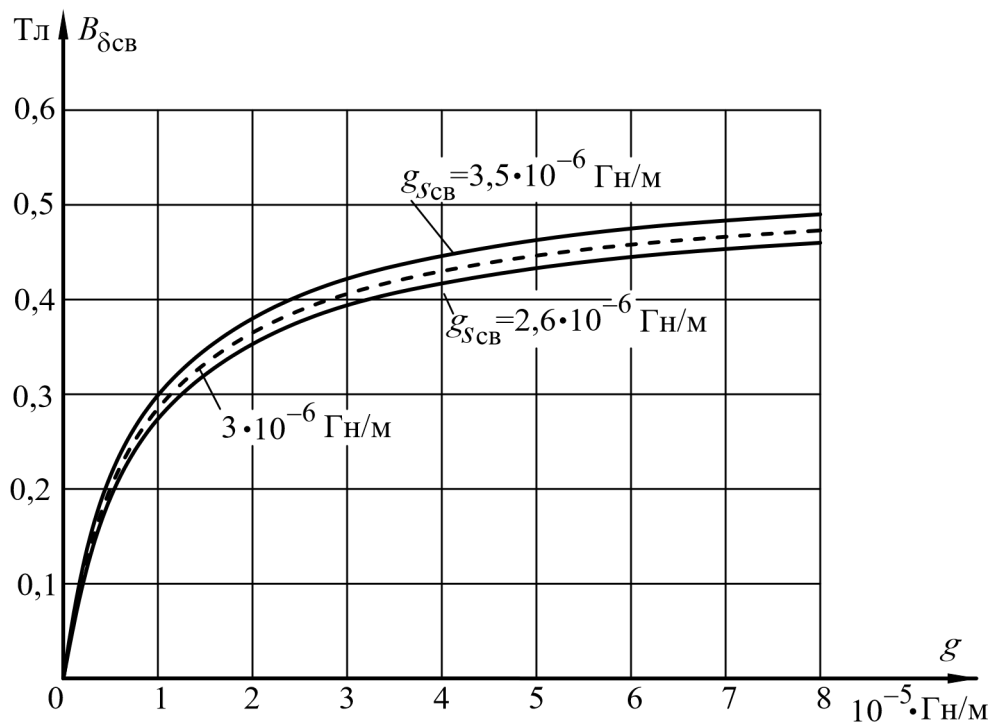
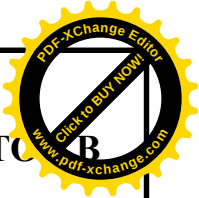


Рис.Б.2. Залежність індукції в повітряному зазорі від питомої провідності при стабілізації магніту у вільному стані для магнітного сплаву ЮНДК18



**Програма для розрахунку механічних характеристик БДПС
с регулятором частоті обертання**

```
program motor;
uses crt,graph;
const
  cm=0.215; ceF=0.0276; r=18.05; mn=0.0381;
  um=24; mm=0.284; nn=753; {вихідні дані}
var
  gt,gm,k,l :integer;
  i,u,n,dm,m,n0,dn :real;

procedure writeg(n:real); {допоміжна процедура}
var st:string;           {для виводу в графічне вікно}
begin
  str(n:5:3,st); outtext(st);
end;

procedure coords; {побудова в графічне вікно}
var k:integer;
    st,i:real;
begin
  moveto(50,8);lineto(50,300);
  lineto(500,300);
  st:=mm/6; i:=st;
  repeat
    k:=trunc(i*350/mm);
    moveto(50+k,300); lineto(50+k,297);
    moveto(20+k,306);writeg(i);
    i:=i+st;
  until i > 0.35;
  st:=nn/5; i:=0;
  repeat
    k:=trunc(i*250/nn);
    moveto(50,300-k); lineto(53,300-k);
    moveto(2,297-k);writeg(i);
    i:=i+st;
  until i > nn;
  moveto(53,5); outtext('n');
  moveto(495,290); outtext('M');
  k:=trunc(350*mn/mm);
  setlinestyle(dashedln,0,NormWidth);
  moveto(50+k,300); linerel(0,-250);
```



end;

procedure draw; {побудова графіка}

var x,y:integer;

begin

x:=round(350*m/mm);

y:=round(250*n/nn);

if y<0 then y:=0;

if y>500 then y:=500;

if x>750 then x:=750;

putpixel(x+50,300-y,17);

end;

procedure motor; {математична модель БДПС}

begin

n:=n0;

i:=m/cm;

u:=ceF*n+i*r;

if u>um then n:=(um-i*r)/ceF;

end;

begin

gt:=d8bit; gm:=m800x600;

initgraph(gt,gm,"");

setbkcolor(white);

setcolor(16);

cleardevice;

coords;

dm:= mm/500;

dn:=nn/5; n0:=dn;

for k:=1 to 5 do

begin

m:=0;

repeat

motor;

draw;

m:=m+dm;

until m>mm;

n0:=n0+dn;

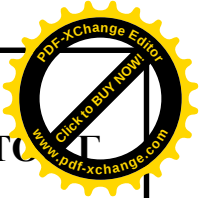
end;

repeat until keypressed;

closegraph;

end.

					141. 4361. БР. ПЗ. Д	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		98

**Програма для розрахунку перехідних процесів при пуску БДПС**

```
program motor1;
uses crt,graph;
const
  cm=0.215; ce=0.0276; r=18.05; j=0.0000157; mn=0.0381;
  um=26.4; nn=753; l=0.0317;

var
  gt,gm :integer;
  i,u,n,n0,t,dt,mc,u1,im :real;

procedure draw(x,y,c:integer);
begin
  if y<0 then y:=0;
  if y>500 then y:=500;
  if x>750 then x:=750;
  putpixel(x+20,510-y,c);
end;

procedure graf;
var x :integer;
begin
  x:=round(t*3500);
  draw(x,0,red);
  draw(x,round(n/5),16);
  draw(x,round(i*200),magenta);
  draw(x,round(u*10),blue);
end;

procedure motor; {математична модель БДПС}
begin
  i:=i+dt*(u-ce*n-i*r)/l;
  n:=n+dt*(i*cm-mc)/j;
end;

procedure regulator; {математична модель регулятора}
var t:real;
begin
  t:=(n0-n)*13.5;
  u1:=u1+dt*t;
  if u1>um then u1:=um;
```

					141. 4361. БР. ПЗ. Д	Лист 99
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



```
if u1<0 then u1:=0;  
u:=u1+(n0-n)*0.3;  
if u>um then u:=um;  
if u<0 then u:=0;  
end;
```

```
begin  
gt:=d8bit; gm:=m800x600;  
initgraph(gt,gm,"");  
setbkcolor(white);  
setcolor(16);  
cleardevice;
```

					141. 4361. БР. ПЗ. Д	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		100



Перелік конструктивних елементів БДПС

ФОРМАТ	ЗОНА	ПОЗ	ПОЗНАЧЕННЯ	НАЙМЕНУВАННЯ	КІЛЬК.	ПРИМІТКА
		1		Вал	1	
		2		Підшипниковий щит	1	
		3		Підшипник	2	
		4		Обмотка якоря	1	
		5		Індуктор двигуна	1	
		6		Пакет якоря	1	
		7		Датчик Холу	6	
		8		Станина	1	
		9		Датчик положення ротора	1	
		10		Підшипникова кришка	1	
		11		Сальник	1	
		12		Вихідні кінці	7	
		13		Фланець	1	
		14		Індуктор датчика положення ротора	1	



СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Балагуров В.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, В.М. Гридин, В.К. Лозенко. – М.: Энергия, 1975. – 128 с.
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины / Бут Д.А. – М.: Высшая школа, 1985. – 255 с.
3. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов [В.Д. Косулин, Г.Б. Михайлов, В.В. Омельченко, В.В. Путников]. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 184с.
4. Долин П.А., Справочник по технике безопасности / Долин П.А. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824с.
5. Кенио Т. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / Т. Кенио, С Нагамори; пер. с англ. к.т.н. А.Ю. Черкашина. – М.: Энергоиздат, 1989. – 182с.
6. Лопухина Е.М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики / Е.М. Лопухина.– М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
7. Павлов Г.В. Розрахунок систем управління імпульсних перетворювачів постійної напруги / Г.В. Павлов, А.В. Обрубов, М.В. Покровський. – Миколаїв: НУК, 2003. – 52с.
8. Постоянные магниты. Справочник. / [А.Б. Альтман, Э.Е. Верниковский, А.Н. Герберг и др.]; под ред. Пятина Ю.М. – М.: Энергия, 1971. – 376с.
9. Проектирование электрических машин / [И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.]; под ред. Копылова И.П. – М.: Энергия, 1980. – 496с.
10. Штёлтинг Г. Электрические микромашины / Штелтинг Г., Байссе А.; пер. с нем. к.т.н. В.А. Алешечкина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 229с.
11. [http://www. Allegromicro. com](http://www.Allegromicro.com).

					141. 4361. БР. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		102



12. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/545567/TI/LM2901>

13. <http://www.okdatasheet.com/datasheets/Infineon/BSS295>.

					141. 4361. БР. ПЗ.	Лист
						103
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		