

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ
ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ**

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.42.11.24.01 ПЗ

Розробив студент групи 214-ЕЕ-Д23
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»
(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)



Андрій СТЕЛЬМАХ

Керівник: к.т.н., доцент кафедри
Надія КАРПЕНКО

Рецензент: к.т.н., доцент кафедри ЕТЕМ
Сергій ЯЦЬКО

Харків – 2024

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет: механіко-енергетичний

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
д-р техн. наук, професор



Михайло БАБАЄВ

«27» грудня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Стельмаху Андрію Романовичу

1 Тема «Підвищення надійності тягових двигунів пульсуючого струму»,
керівник: Карпенко Надія Петрівна, канд. техн. наук, доцент,
затверджені наказом по механіко-енергетичному факультету УкрДУЗТ від 30 вересня
2024 року № 42.

2 Строк подання студентом закінченої роботи: 02 січня 2025 року.

3 Вихідні дані:

- тип ТЕД – НБ-418К;
- серія електровоза – ВЛ80;
- тип струму – пульсуючий;
- напруга, $U = 950 \text{ В}$;
- номінальний струм, $I_a = 820 \text{ А}$;
- діаметр якоря, $D_a = 660 \text{ мм}$;
- кількість пазів якоря, $z = 87$;
- кількість колекторних пластин, $k = 348$;
- кількість активних провідників, $N = 696$;
- розмір міді обмотки якоря, $b_{np} \times h_{np} = 3,53 \times 6,9 \text{ мм}$;
- кількість полюсів, $2p = 6$;
- розмір паза якоря, $h_z, b_n = 10 \times 42,2 \text{ мм}$;
- довжина пакета якоря, $l_a = 385 \text{ мм}$;

- магнітний потік, $\Phi_n = 0,09 \text{ Вб}$;
- повітряний проміжок під головним полюсом, $\delta_m = 4,7 \text{ мм}$;
- повітряний проміжок під додатковими полюсами, $\delta_d = 7 \text{ мм}$.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- 1) Аналіз функціонування колекторних тягових двигунів на рухомому складі при пульсуючій напрузі живлення
- 2) Проектування тягового електричного двигуна.
- 3) Спеціальна частина.
- 4) Конструкція модернізованого ТЕД НБ-418К.
- 5) Ремонт компенсаційної обмотки.
- 6) Опис силової схеми електровоза ВЛ80.
- 7) Техніко-економічне обґрунтування проведення модернізації ТЕД електровоза ВЛ80.

5 Перелік ілюстративного матеріалу:

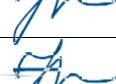
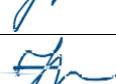
- 1) Титульний аркуш презентації – один слайд (формат А4).
- 2) Загальна характеристика кваліфікаційної роботи – один слайд (формат А4).
- 3) Вплив пульсацій струму на процес комутації – один слайд (формат А4).
- 4) Вплив пульсацій струму на роботу тягових двигунів – один слайд (формат А4).
- 5) Способи та пристрої поліпшення комутації – один слайд (формат А4).
- 6) Шихтування магнітної системи ТЕД пульсуючого струму – один слайд (формат А4).
- 7) Оцінка рівня небалансної ЕРС – один слайд (формат А4).
- 8) Вихідні дані тягового двигуна НБ-418К – один слайд (формат А4).
- 9) Ескіз міжполюсного вікна та схема заміщення магнітного ланцюга додаткових полюсів двигуна НБ-418К – один слайд (формат А4).
- 10) Методика розрахунку магнітних потоків додаткових полюсів – один слайд (формат А4).
- 11) Електрична схема форсованого збудження додаткових полюсів – один слайд (формат А4).
- 12) Електромеханічні характеристики двигуна – один слайд (формат А4).
- 13) Візок електровоза ВЛ80 – один слайд (формат А4).
- 14) Схема силових кіл електровоза ВЛ80 – один слайд (формат А4).
- 15) Вихідні дані для розрахунку економічного ефекту – один слайд (формат А4).
- 16) Висновки – один слайд (формат А4).

6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування	Уткіна Ю.М., доцент, канд. економ. наук		

7 Дата видачі завдання: 01 жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз функціонування колекторних тягових двигунів при пульсуючій напрузі живлення	03.10 – 17.10	
2	Проектування тягового електричного двигуна	18.10 – 03.11	
3	Конструкція тягового електричного двигуна	04.11 – 14.11	
4	Ремонт компенсаційної обмотки	15.11 – 20.11	
5	Опис схеми силових кіл електровоза	21.11 – 28.11	
6	Техніко-економічне обґрунтування проведення модернізації двигуна	29.11 – 14.12	
7	Ілюстративні матеріали	15.12 – 27.12	
8	Нормоконтроль. Підготовка до захисту	28.12 – 02.01	

Студент  Андрій СТЕЛЬМАХ

Керівник  Надія КАРПЕНКО

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 105 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 21 рисунок, 14 таблиць, 17 літературних джерел, 1 додаток.

Ключові слова: тяговий двигун пульсуючого струму, комутація, небалансна ЕРС, магнітне коло додаткових полюсів, вихрові струми, форсуючий пристрій.

Об'єктом дослідження є процес комутації тягового двигуна пульсуючого струму.

Метою дослідження є вдосконалення конструкції тягового двигуна пульсуючого струму.

У кваліфікаційній роботі розглянуто покращення комутації тягового двигуна електровоза ВЛ80 шляхом застосування форсованого збудження додаткових полюсів, виконано розрахунок магнітного кола додаткових полюсів з урахуванням вихрових струмів, розглянуто ремонт компенсаційної обмотки двигуна.

ABSTRACT

This qualification paper includes 105 sheets of A4 explanatory note, including 21 pictures, 14 tables, 17 literary sources, 1 supplement.

Keywords: pulsating current traction motor, commutation, unbalanced EMF, magnetic circle of additional poles, vortex currents, anteroom.

The object of research is the process of switching the pulsating current of the traction motor,

The aim of research is to improve the design of the pulsating current traction motor.

In the qualifying work the improvement of commutation of the traction motor of the electric locomotive ВЛ80 by the application of forced excitement of additional poles, the calculation of the magnetic circuit of the additional poles, taking into account vortex currents, is considered, repair of the compensating winding of the engine is considered.

Зміст

Вступ	
1 Аналіз функціонування колекторних тягових двигунів на рухомому складі при пульсуючій напрузі живлення	
1.1 Особливості роботи тягових двигунів пульсуючого струму	
1.2 Аналіз способів і пристроїв покращення комутації тягових двигунів пульсуючого струму	
2 Проектування тягового електричного двигуна	
2.1 Розрахунок активного шару якоря	
2.2 Розрахунок компенсаційної обмотки	
2.3 Розрахунок магнітного кола ТЕД	
2.4 Визначення характеристик ТЕД	
3 Спеціальна частина.....	
3.1 Методи оптимального проектування магнітної системи і тягових двигунів для роботи при пульсуючому живленні	
3.2 Розрахунок форсуючого пристрою	
3.3 Визначення джерела вихрових струмів у ділянці остову	
4 Конструкція модернізованого ТЕД НБ-418К	
5 Ремонт компенсаційної обмотки	
6 Опис силової схеми електровоза ВЛ80	
7 Техніко-економічне обґрунтування проведення модернізації тягового електродвигуна електровоза ВЛ80	
7.1 Економічна ефективність застосування модернізованого ТЕД в експлуатації	

					<i>KPM.273.42.11.24.01 ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підвищення надійності тягових двигунів пульсуючого струму	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.	Стельмах							
Перевір.	Карпенко						6	105
Рецензент	Яцько					УкрДУЗТ		
Н.контр.	Маслій							
Затверд.	Бабасв							

7.2	Витрати підприємства на оплату праці працівникам
7.3	Капітальні витрати на модернізацію одного ТЕД
7.4	Скорочення поточних витрат на електроцітки
7.5	Розрахунковий період економічного ефекту
	Висновки
	Список використаних джерел
	Ілюстративний матеріал до кваліфікаційної роботи

					КРМ.273.42.11.24.01 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Для забезпечення виконання вантажних і пасажирських перевезень потрібно значну увагу приділяти оновленню парку локомотивів, його своєчасному та якісному ремонту. Разом із цим старіння локомотивного парку і його ремонтних комплексів веде до різкого погіршення їх технічного стану. У зв'язку з цим питання модернізації та підвищення ефективності використання наявних електровозів, як і раніше, залишається актуальною проблемою з огляду на економічну ситуацією, що склалася в Україні.

Одним із головних напрямів роботи АТ «Укрзалізниця» є розвиток технічної бази, що ґрунтується на прогностичних показниках діяльності галузі щодо забезпечення перевезень вантажів і пасажирів і поділяється на короткостроковий (3-5 років); середньостроковий (5-10 років); довгостроковий (10-20 років) періоди, що залежить від обсягів фінансування. Практично для всіх напрямів розвитку технічних засобів можна визначити три стадії технічного переоснащення: 1) подовження терміну служби існуючих технічних засобів, їхню модернізацію та часткове оновлення; 2) глибоку модернізацію та кардинальне оновлення технічних засобів; 3) перехід на інноваційні технічні засоби [14].

Проблему модернізації тягового рухомого складу досліджують науковці і виробничники та пропонують різні варіанти модернізації електричного рухомого складу: від незначного втручання в конструкцію до заміни майже всього обладнання.

Як відомо, якість роботи електрорухомого складу, як правило, залежить від рівня безвідмовності в експлуатації. Перебої в роботі, зупинки і затримки на шляху прямування, спричинені відмовою локомотивів, призводять до зниження ефективності використання залізничних колій та значних економічних втрат. Досягнути підвищення надійності локомотивів, покращення їх техніко-економічних показників можна вдосконаленням експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

Загальною тенденцією у сфері організації технічного обслуговування та ремонту локомотивів є бажання знизити затрати на їх виконання і досягнути більш високих значень міжремонтних пробігів за умови забезпечення їх надійної роботи.

На сьогодні на електрорухомому складі України в якості тягових застосовують лише колекторні тягові електродвигуни постійного і пульсуючого струму, кількість яких налічує тисячі одиниць і найближчою реальною альтернативою використання в електричній тязі інших типів ТЕД поки немає [5].

Активне використання колекторних двигунів послідовного збудження зумовлено їх перевагами порівняно з іншими, зокрема:

- наявність природної механічної характеристики, яка найбільш повно відповідає умовам реалізації сил тяги;
- можливість регулювання частоти обертання(n) у межах від 0 до $n_{\max}$ і можливість тривалої роботи на будь-якому проміжному етапі регулювання;
- використання такого типу двигунів дозволяє спростити схему силових ланцюгів ЕРС і забезпечити підвищені пускові моменти і мінімальну кількість переключень силового електрообладнання;
- мінімальний перерозподіл струмових і тягових навантажень між електродвигунами ЕРС при експлуатаційних та технологічних допусках за рахунок «м'яких електромеханічних характеристик» [8].

Основним недоліком колекторних двигунів є наявність щітково-колекторного вузла, з яким пов'язані труднощі роботи машини в комутаційному і потенційному відношенні, надійність роботи, високі енергетичні та експлуатаційні витрати при використанні на ЕРС [1; 2].

Поліпшити умови роботи ТЕД постійного струму можливо при використанні імпульсних систем регулювання та електроприводів з асинхронними двигунами [1].

Електрорухомий склад з асинхронними ТЕД активно використовується на залізницях Західної Європи, Японії, ведуться проектні роботи і створені дослідні зразки такого типу рухомого складу на Україні [5].

Перехід рухомого складу залізниць на асинхронний привід пов'язаний з якісним розвитком силової напівпровідникової техніки та значними матеріальними затратами, що в сучасних умовах не представляється можливим.

Таким чином, на залізницях України до появи асинхронного приводу, колекторні двигуни поки є основними і будуть ними залишатися в найближчі 10 років [5]. Удосконалення конструкції цих двигунів повинно бути спрямовано на поліпшення комутації при пульсуючому живленні.

Як відомо, надійність тягового рухомого складу значною мірою залежить від надійності роботи тягових двигунів. Досвід експлуатації тягових двигунів електровоза ВЛ80 свідчить, що комутація цих двигунів виходить за межі допустимих значень, що виявляється в підвищенні іскріння на колекторі, зносі щіток і колектора, зниженні потенціальної стійкості двигуна. Зниження надійності функціонування двигуна пояснюється демпфіюванням комутуючого магнітного потоку вихровими струмами, що призводить до виникнення некомпенсованої електрорушійної сили в комутуючих секціях і як наслідок – до зниження комутаційної стійкості [2; 4].

Саме тому в магістерській роботі розглядається модернізація тягових двигунів пульсуючого струму електровоза ВЛ80 шляхом покращення їх комутаційних властивостей. Запропонована модернізація дозволить підвищити надійність тягового двигуна НБ-418К в експлуатації.

1 Аналіз функціонування колекторних тягових двигунів на рухомому складі при пульсуючій напрузі живлення

1.1 Особливості роботи тягових двигунів пульсуючого струму

Живлення електродвигунів від випрямних пристроїв знайшло застосування не тільки в промисловості, а й на транспорті. Розвиток напівпровідникової техніки зумовив створення компактних, економічних і відносно дешевих перетворювачів. Однак при безперечних перевагах тиристорних випрямлячів порівняно з електромашинними, їм притаманний відомий недолік – наявність у кривій випрямленої напруги змінної складової, що призводить до виникнення ряду особливостей у роботі двигунів. Пульсації напруги спричиняють пульсації струмів ланцюзі електродвигунів, рівень яких залежить від фазності випрямного пристрою [1].

Двигуни загальнопромислового призначення живляться від трифазних випрямлячів, випрямлена напруга при цьому практично постійна (пульсації на рівні 4-7%). Двигуни транспортних засобів, особливо ТЕД магістральних електровозів, живляться від однофазної перетворювальної установки, яка не в змозі забезпечити таку ж якість випрямлення, тому пульсації струму можуть досягати 40% і більше. На тих, що експлуатуються, ТЕД електровозів змінного струму ВЛ60, ВЛ80, пульсації струму обмежують рівнем 20-25% у номінальному режимі. Допустимий рівень пульсацій досягається застосуванням реактора, що згладжує, індуктивність якого становить 85% від індуктивності обмотки збудження і в реальних схемах електроприводу, наприклад, на електровозі ВЛ80 становить 6 мГн [1; 8].

На рис. 1.1 показано спрощену схему електрорухомого складу змінного струму. Тяговий трансформатор Tr служить для зниження напруги контактної мережі $U_m = 25$ кВ до значення, необхідного для роботи тягових електродвигунів. У випрямлячі B змінний струм перетворюється в постійний пульсуючий струм.

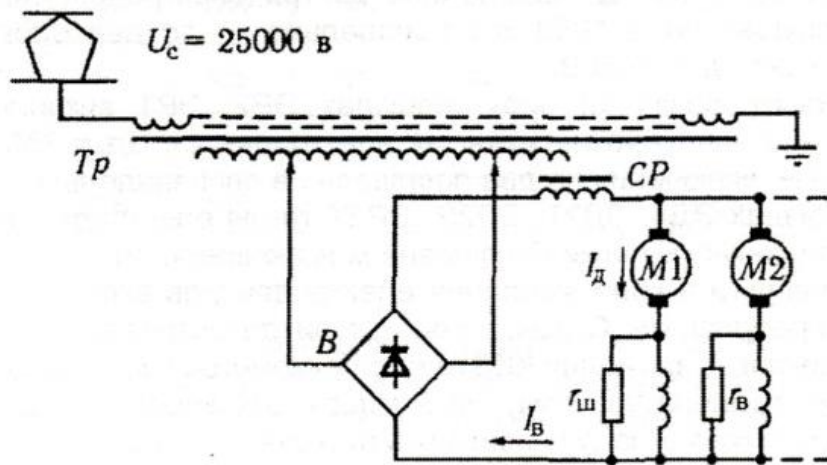


Рис. 1.1- Спрощена схема електрорухомого складу змінного струму

Тягові електродвигуни M1, M2 і т. д. на електровозах вмикають паралельно. На електропоїздах використовують іноді послідовно-паралельне з'єднання (наприклад, на електропоїздах ЕР9). Пульсації струму викликають пульсації магнітного потоку головних полюсів. Зменшення пульсації магнітного потоку необхідне для покращення комутації тягового електродвигуна і зниження магнітних втрат. Тому в коло випрямленого струму включений згладжуючий реактор CP, який зменшує ці пульсації. Крім того, паралельно обмотці збудження, установлюють резистор $R_{ш}$, який має незначний індуктивний і великий активний опір. Якщо умовно розкласти пульсуючий випрямлений струм на змінну і постійну складові, то побачимо, що його змінна складова замикається в основному через шунтувальний резистор $R_{ш}$, який має значно менший індуктивний опір, чим обмотка збудження, а постійна складова — в основному через обмотку збудження, яка має активний опір значно менше, ніж шунтувальний резистор. Таким чином, резистор $R_{ш}$ відіграє роль фільтра. Через обмотку збудження проходить в основному постійна складова, внаслідок чого знижуються пульсації струму та магнітного потоку. У зв'язку із включенням постійного резистора $R_{ш}$ тягові електродвигуни електрорухомого складу змінного струму працюють не при повному збудженні, а при так званому нормальному збудженні, яке становить 0,92...0,97 від повного. Напругу на електродвигунах регулюють, змінюючи коефіцієнт трансформації трансформатора. Для цього ступінчасто змінюють число витків його обмоток. Такі ступені регулювання напруги на електродвигунах називають позиціями головного перемикача.

Коефіцієнт пульсацій особливо зростає при струмах менше номінального і високих напругах, що відповідає високим швидкостям руху локомотивів [8].

Питання, пов'язані з особливостями роботи двигунів при живленні їх від випрямних пристроїв, досить широко розглянуті в роботах [1; 4; 7; 8]. У них зазначається, що основною причиною погіршення надійності роботи машин, що живляться пульсуючим струмом, є підгар колектора і знос щіток, що спричинено виникненням додаткових електрорушійних сил (ЕРС) при комутаційному процесі. Додаткові ЕРС зумовлені змінною складовою струму якоря, а саме: змінна складова реактивної ЕРС і трансформаторна ЕРС від пульсацій основного потоку.

Відомо, що безіскрові режими роботи забезпечуються при компенсації всіх ЕРС у комутуючій секції, що не вдається зробити в двигунах пульсуючого струму, оскільки виникає некомпенсована ЕРС. Основні труднощі при цьому виникають через зниження значення змінної складової комутуючого магнітного потоку, внаслідок демпфування її вихровими струмами.

Змінна складова реактивної ЕРС зумовлена полями розсіювання, що замикаються поперек паза в розшарованому осерді якоря, і практично не демпфуються. З літератури відомо, що кут відставання реактивної складової від змінної складової струму якоря складає $3-5^\circ$, і при розгляді балансу ЕРС його можна не враховувати, тобто вважати, що реактивна ЕРС змінюється синхронно зі струмом якоря [1].

Величина некомпенсованих ЕРС залежить від конструктивного виконання магнітної системи ТЕД [8] (рисунок 1.2).

При масивній станині і масивних осердях додаткових полюсів (ДП) відбувається демпфування комутуючого потоку по амплітуді і «перекидання» по фазі, тобто фазовий зсув між потоком і комутуючим потоком більше (за початок відліку прийнята змінна складова струму якоря). Нескомпенсована ЕРС досягає при цьому значної величини (рисунок 1.2, а).

Більш сприятлива ситуація у ТЕД, що мають масивну станину і розшаровані осердя ДП. Застосування розшарованих осердь ДП призводить до зниження фазового зсуву між струмом і комутуючим потоком і до збільшення амплітуди

останнього внаслідок зниження демпфуючого впливу вихрових струмів. Нескомпенсована ЕРС у цьому випадку буде менше (рисунок 1.2, б).

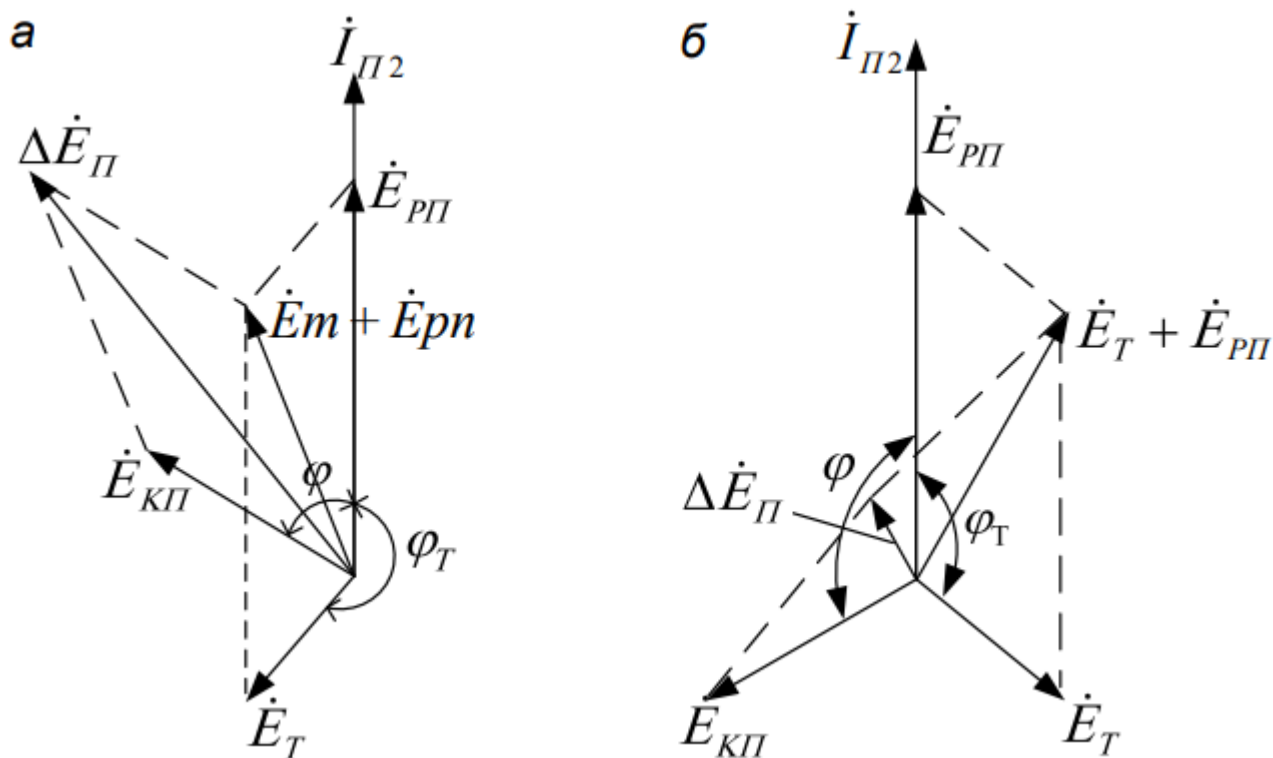


Рисунок 1.2 – Векторна діаграма некомпенсованих ЕРС

При розширеній магнітній системі ТЕД демпфування комутуючого потоку буде мінімальним, проте таке рішення не зменшує небалансний ЕРС [17] і з міркувань міцності для ТЕД неприйнятно.

Змінна складова некомпенсованих ЕРС Δe змінюється по модулю і фазі при зміні режимів роботи. Чим менше вихрові струми в сталевих магнітопроводах двигуна, тим повніше компенсація змінних складових ЕРС у різних режимах роботи як при повному, так і при ослабленому збудженні, за значенням Δe часто оцінюють якість комутації ТЕД пульсуючого струму (рис. 1.3)

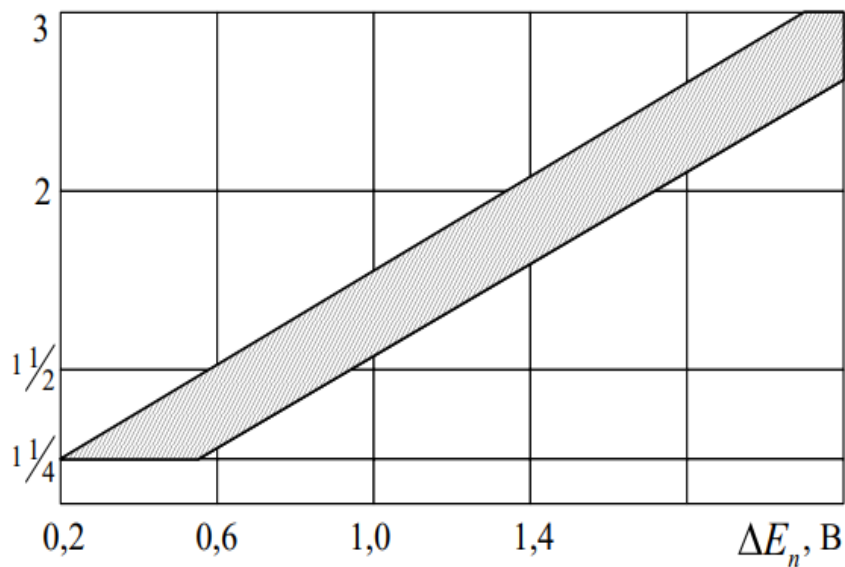


Рис. 1.3 - Залежність ступеня іскріння від некомпенсованої ЕРС

При рівні некомпенсованих ЕРС $0,5...0,7В$ ступінь іскріння менше $1\frac{1}{2}$ бала, що, як правило, допускається за умовами роботи ТЕД, а якщо некомпенсована ЕРС дорівнює $1,0...1,1В$, то ступінь іскріння досягає 2-х балів. ТЕД у такому режимі може працювати лише короткочасно [1].

Крім погіршення комутації, пульсації струму обумовлюють коливання магнітного потоку, що призводить до додаткових втрат від вихрових струмів в елементах магнітної системи до 2,5% і наведення трансформаторної ЕРС у комутуючій секції [1].

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених вивченню та аналізу особливостей роботи двигунів пульсуючого струму, а також методам розрахунку ЕРС у комутуючих секціях і комутуючого потоку, проблема надійної роботи цих ТЕД не вирішена і продовжує залишатися актуальною на сьогодні.

1.2 Аналіз способів і пристроїв поліпшення комутації тягових двигунів пульсуючого струму

У розділі 1.1 проаналізовано особливості роботи ТЕД при пульсуючій напрузі, підтверджено, що без відповідних змін у конструкції двигунів неможливо домогтися задовільної комутації, а значить, і забезпечити достатній рівень надійності машини.

На рисунку 1.4 наведено класифікаційну схему поліпшення комутаційних якостей, зокрема, підвищення надійності ТЕД при пульсуючій напрузі живлення. Умовно всі способи розділені на три види: конструкційні, схемні та схемно-конструкційні.

Під конструкційними варто розуміти ті способи, які поліпшують режим роботи ТЕД при пульсуючому живленні за рахунок зміни конструкції двигуна в порівнянні з його роботою на постійному струмі.

Під схемними мають на увазі способи, які поліпшують роботу ТЕД пульсуючого струму за рахунок зміни схем вмикання додаткових пристроїв, не змінюючи конструкцію самого двигуна.

Третій спосіб поліпшення комутаційних якостей ТЕД є комбінацією перших двох.

Розглянемо більш докладно ці способи і визначимо їх вплив на поліпшення роботи ТЕД при пульсуючій напрузі живлення.

Забезпечити задовільний режим роботи ТЕД на електровозах змінного струму ВЛ80, ВЛ60 вдалося завдяки конструктивним рішенням: розшаруванню осердя ДП, застосуванню компенсаційної обмотки, шунтуванню обмотки збудження постійним резистором.

Наявність розшарованих осердь у цих двигунах знижує демпфуючу дію вихрових струмів на комутуючий магнітний потік. Застосування компенсаційної обмотки знижує потік розсіювання додаткового полюса.

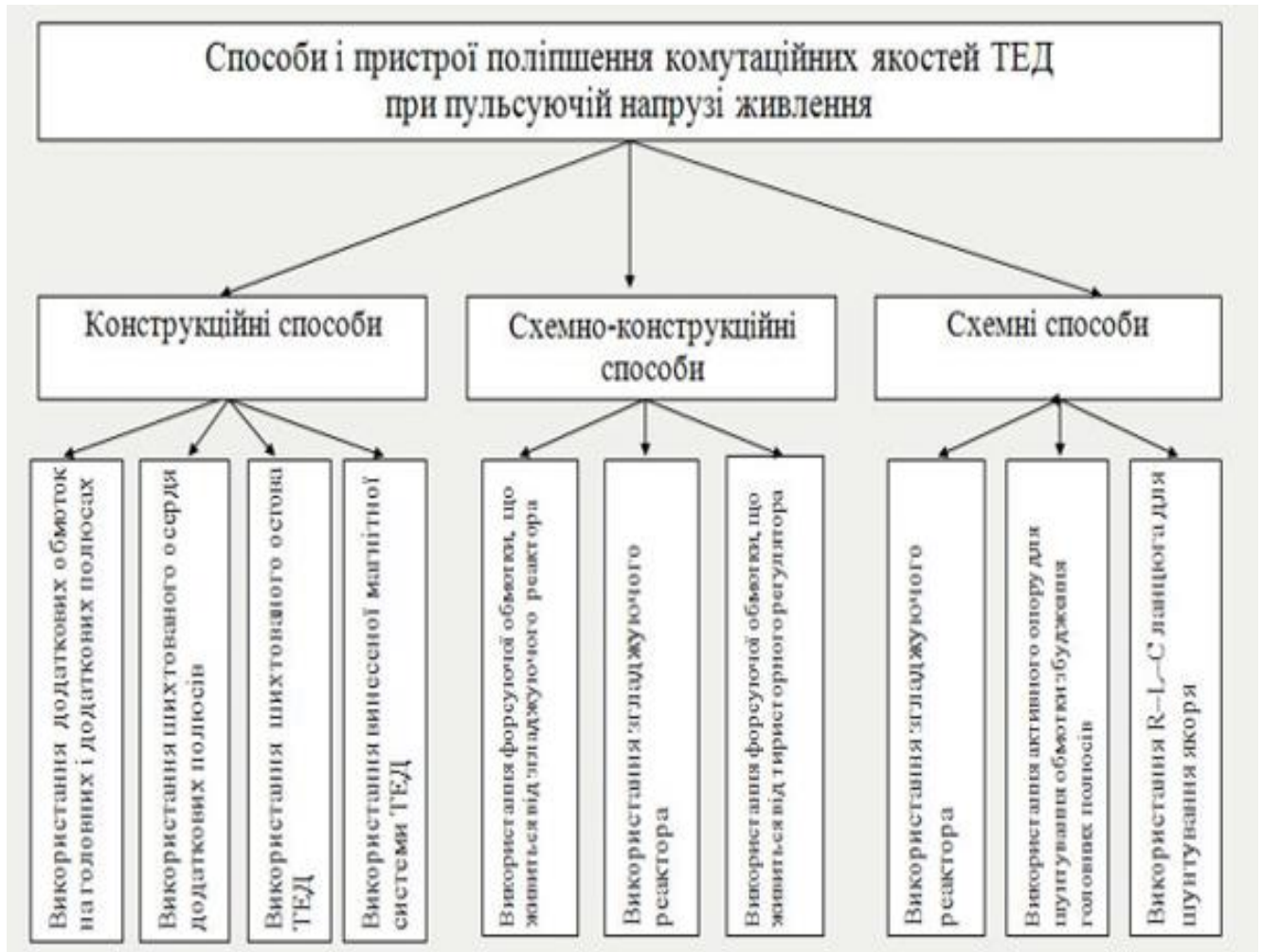


Рис.1.4 - Класифікаційна схема поліпшення комутаційних якостей ТВД

Як правило, коефіцієнт магнітного розсіювання ДП великий, складає в некомпенсованих тягових двигунах величину 3,5-4, а в компенсованих, приблизно, в 1,5 рази менше. Зниження повного магнітного потоку ДП при зниженні магнітного розсіювання в компенсованих тягових двигунах знижує загальний рівень вихрових струмів у демпфованих ділянках магнітопроводу ДП і ступінь демпфіювання на комутуючий магнітний потік [1].

Разом з тим компенсаційна обмотка знижує пульсації напруги між суміжними колекторними пластинами, унаслідок чого покращуються потенційні умови на колекторі.

Згідно з дослідженнями [2] при коефіцієнті пульсації струму 25% максимальна міжламільна напруга може підвищуватися на 10-20%, що спостерігається протягом напівперіоду основної гармоніки випрямленого струму,

коли потенційні умови погіршуються і з'являється можливість виникнення колового вогню.

При масивному остові ТЕД змінна складова комутуючого магнітного потоку демпфується вихровими струмами. У потужних двигунах це призводить до погіршення комутації на один-півтори бали порівняно з комутацією при живленні машини постійним струмом. Для усунення цього недоліку використовують різні конструкційні заходи. Наприклад, в остов запресовують пакет із штампованих листів електротехнічної сталі або повністю середню частину магнітопроводу ТЕД виконують шихтованою і закріплюють її між двома масивними елементами, що виконують функцію частини ярма статора.

Передбачається, що в цих випадках змінні складові потоків проходять по шихтованій частині ярма, а постійні складові – по всьому його перетину. Однак при цьому шихтована частина насичується постійною складовою магнітного потоку, що різко погіршує її магнітну провідність для змінної складової комутуючого потоку.

Для усунення цього недоліку і скорочення витрат листової сталі запропоновано ряд конструкцій, в яких робиться спроба розділити шляхи головного і комутуючих потоків [8].

Найпростішим чином це завдання вирішується застосуванням шихтованих вставок, розміщених між осердям головних полюсів (ГП) і ярмом по всій довжині полюса. За межами осердя ДП вони проходять у деякому віддаленні від ярма і примикають до осердя ДП також із проміжком. Змінюючи ці проміжки, прагнуть домогтися такого становища, при якому змінна складова комутуючого потоку буде повністю проходити по шихтованим вставкам, а постійна складова головного потоку – по масивному ярму.

При заданих розмірах ярма, що характерно для ТЕД рухомого складу, така конструкція скорочує висоту осердя ГП і погіршує розміщення його котушки.

Існує варіант цієї конструкції, в якому шихтовані вставки тієї ж форми утоплюються в кільцеві виточки в ярмі [1]. Це призводить до скорочення перетину ярма або необхідності збільшити його зовнішні розміри.

Інший спосіб вирішення цього завдання з виконанням винесеної магнітної системи (ВМС) комутуючого потоку або створенням додаткових шляхів для його проведення [1].

При використанні ВМС по шихтованих елементах проходить значна частина постійної і практично вся змінна складова магнітного потоку. Шихтовані елементи проходять поблизу обмоток ДП, що скорочує вільну висоту осердя ДП, яке служить для розміщення його обмотки збудження.

Проте така конструкція легко здійсненна в компенсованих машинах, де котушка ДП має менші розміри і немає необхідності в збільшенні зовнішнього розміра ярма.

У наукових розробках досліджено вплив демпфування комутуючого потоку вихровими струмами, що виникають у магнітній системі машини, запропоновані деякі конструктивні заходи, що дозволяють підвищити комутаційну надійність двигунів даного типу, розглядаються різні способи поліпшення роботи двигунів, що живляться пульсуючим струмом, зокрема, доводиться доцільність повного розшарування магнітної системи машини і пропонується спеціальна конструкція статора [1; 4; 7; 8].

Проведені дослідження засвідчили, що і при повністю шихтованій магнітній системі належного поліпшення роботи ТЕД не спостерігається, крім того, відбувається зниження його міцності.

Більшість робіт даного напрямку належать до ТЕД послідовного збудження, в яких для зменшення рівня некомпенсованих ЕРС вдається використовувати трансформаторну ЕРС. Трансформаторна ЕРС зумовлюється змінною складовою магнітного потоку головних полюсів, вона поліпшує загальний баланс змінної ЕРС і сприяє якісному поліпшенню комутації.

Результати досліджень засвідчують, що зміна в конструкції ТЕД, зокрема, розшарування магнітопроводу, збільшення повітряного проміжку під ДП, розташування обмотки ДП ближче до якоря, спрямовані на зниження демпфуючого впливу вихрових струмів, не дозволяє досягти бажаного результату: синхронної зміни змінних складових струму і магнітного потоку.

Більш перспективним напрямком поліпшення працездатності ТЕД слід визнати застосування форсуючих пристроїв (ФП). ФП, як правило, використовувалися для двигунів, що працюють при перехідних процесах [13].

Форсована зміна намагнічуючої сили ДП пропорційно швидкості зміни струму якоря може бути здійснено з використанням падіння напруги на індуктивностях. В теорії машин постійного струму в якості подібного пристрою рекомендується застосування індуктивних шунтів. Результати дослідження комутації в перехідних режимах машин великої потужності постійного струму засвідчили, що можливі параметри індуктивного шунта виявляються, як правило, дуже далекі від значень, при яких задовольняються умови ідеального форсування. Застосування індуктивного шунта як форсуючого пристрою не може бути ефективно використано внаслідок обмежених значень коефіцієнта шунтування.

До схемних методів підвищення надійності двигунів пульсуючого струму можна також віднести використання згладжуючих реакторів, застосування активних опорів для шунтування обмотки збудження ДП і використання $R - L - C$ -ланцюгів для шунтування обмотки якоря [1].

При вмиканні послідовно з ТЕД згладжуючого реактора форма струму поліпшується. Крива напруги при цьому має незначні пульсації, якщо індуктивність реактора перевищує індуктивності обмоток тягового двигуна. Згладжуючий реактор зазвичай вибирається таким, щоб коефіцієнт пульсацій не виходив за межі 0,2-0,4 при будь-яких режимах роботи ТЕД.

Для поліпшення роботи ТЕД бажано мати мінімальні значення коефіцієнта пульсацій, але при цьому збільшуються витрати на реакторне обладнання, втрати в ньому і масогабаритні показники.

Перебіг змінної складової по ланцюгу обмотки ДП призводить до виникнення значної трансформаторної ЕРС і різкого збільшення втрат у масивних елементах магнітопроводу. Значно послабити змінний магнітний потік на шляху основного магнітного потоку вдається шунтуванням обмотки головних полюсів резистором. При цьому перебіг змінної складової струму по ланцюгу обмотки якоря і додаткових полюсів супроводжується лише створенням незначного комутуючого потоку, який не спричиняє істотних втрат у сталі [1].

Однак приєднання резистора до затискачів обмотки збудження чинить значний вплив на ряд параметрів ТЕД, а саме на його індуктивний опір і втрати. Крім того, у шунтуючому резисторі виникають значні втрати, які в деяких випадках можуть досягати 2% від потужності, що витрачається на тягу і значно знижують коефіцієнт корисної дії всього електроприводу.

Поліпшення комутації при пульсуючому живленні ТЕД може бути досягнуто за рахунок компенсації змінної складової реактивної ЕРС шляхом шунтування якоря $R - L - C$ контуром. Такий пристрій було випробувано на тяговому електродвигуні електровоза змінного струму і виявився досить ефективним, але слід при цьому враховувати значні масогабаритні показники контуру, оскільки він вмикається на повну напругу живлення двигуна.

Перераховані схемні методи доцільно використовувати при живленні двигунів постійним струмом і напругою, а при пульсуючій напрузі живлення ТЕД вони малоефективні.

Розвитком схем форсування з'явився винахід схеми форсуючого реактора і самофорсуючого ДП, які можна віднести до схемно-конструкційних методів підвищення працездатності ТЕД.

Принципова схема форсуючого реактора наведена на рисунку 1.5.

Приріст намагнічуючої сили ДП у перехідних режимах досягається живленням форсуючої обмотки, розташованої на осерді ДП від реактора, який вмикається послідовно в ланцюг якоря машини. Необхідна сталість індуктивності реактора в робочому діапазоні навантажень забезпечується наявністю немагнітного проміжку в магнітопроводі.

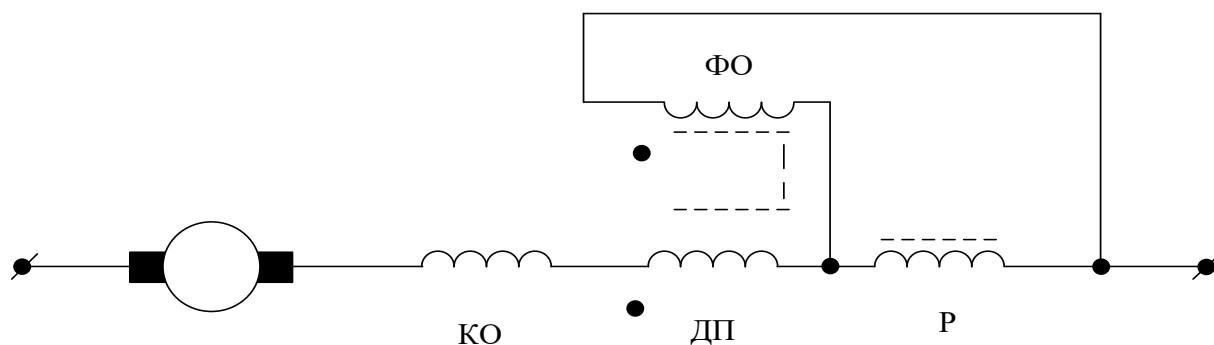


Рисунок 1.5 – Принципова схема форсуючого реактора

Форсуючу обмотку вмикають паралельно обмотці реактора таким чином, щоб при сталих режимах полярність складової комутуючого потоку, що створюється додатковою обмоткою, збігалася з полярністю додаткового полюса [13].

Результати проведених дослідів засвідчують, що застосування схеми форсуючого реактора дозволяє підвищити амплітуду змінної складової комутуючого потоку в необхідних межах. Однак фазове відставання магнітного потоку буде значним навіть при розміщенні форсуючої обмотки на наконечнику ДП. При інших розташуваннях форсуючої обмотки фазовий зсув зростає.

Як форсуючий пристрій можуть застосовуватися також самофорсуючі ДП [13].

Джерелом живлення форсуючої обмотки служить індуктивність самої обмотки ДП. Самофорсуючі ДП мають дві обмотки збудження, ввімкнені паралельно і узгоджено в магнітному відношенні (рисунок 1.6).

Одна з обмоток є обмоткою збудження ДП, друга – форсуючою. ФО розташовується на наконечнику ДП, має кількість витків більше, ніж в основній обмотці, а індуктивність менше.

У процесі зростання навантаження МРС ДП збільшується на величину, яка визначається добутком форсуючого струму на різницю кількості витків ФО й основної обмотки ДП. При зниженні навантаження МРС ДП зменшується на величину, яка визначається аналогічно.

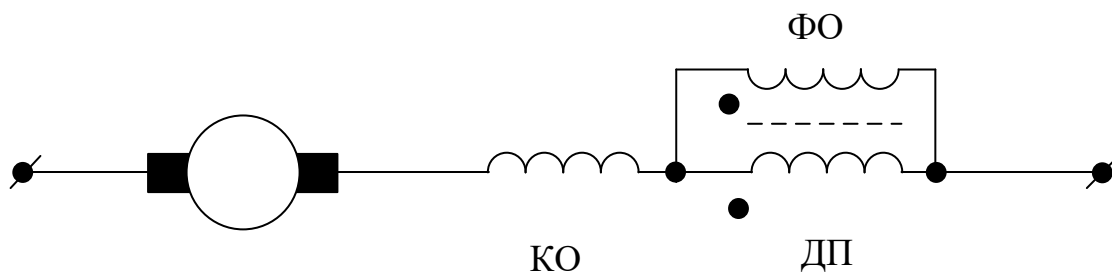


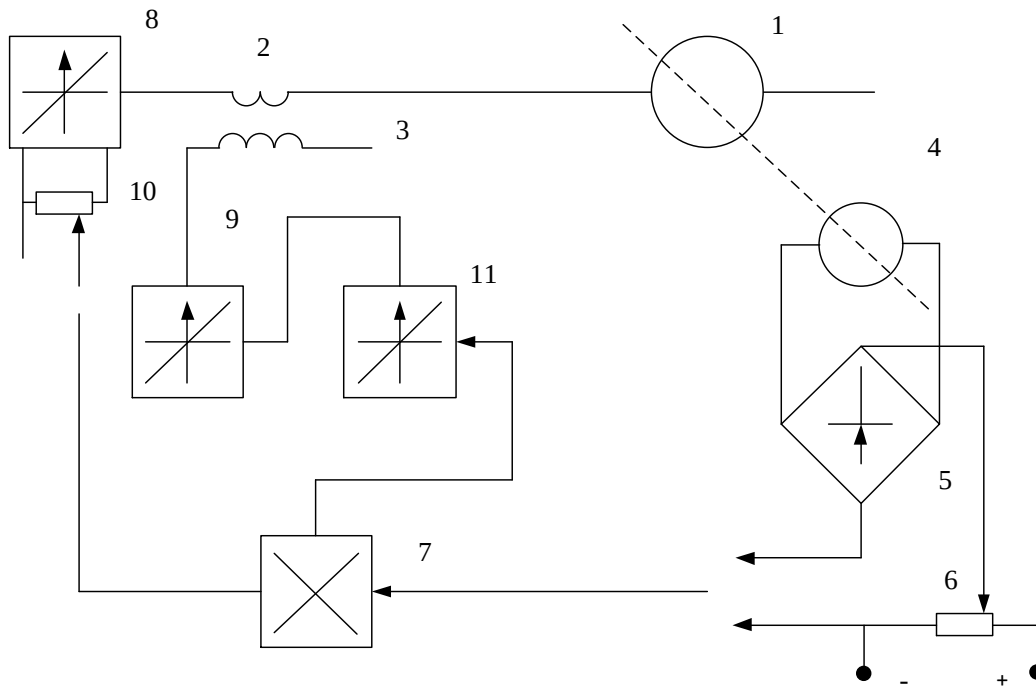
Рисунок 1.6 – Принципова схема самофорсуючого ДП

Використання такого пристрою дозволяє підвищити амплітуду магнітного потоку, але фазовий зсув залишається істотним, що спричиняє небалансну ЕРС у комутуючій секції. Регулювання намагнічуючої сили в ДП з метою забезпечення оптимальних умов комутації в робочих режимах ТЕД може бути здійснено за допомогою пристрою, принципова схема якого наведена на рисунку 1.7.

Пристрій складається з джерела 9 форсування намагнічуючої сили ДП, який може бути ввімкнений безпосередньо до обмотки 2 ДП, але краще до невеликої ФО 3, розташованої на осердях ДП. Як джерело може бути застосований тиристорний перетворювач із реверсивним виходом.

Величина і форма струму в ФО регулюється автоматично за допомогою датчика струму 10 і функціонального перетворювача 11.

У пристрої, представленому на рисунку 1.7, пропонується поєднати датчик струму і функціональний перетворювач, у результаті чого на систему управління реверсивного тиристорного перетворювача подається посилений сигнал неузгодженості двох генераторів ЕРС Холла, один з яких встановлюють у повітряному проміжку під ДП, другий – у проміжку магнітопроводу, що охоплює шину з струмом якоря. Вихідні ЕРС генераторів Холла ввімкнені послідовно й зустрічно і побудовані таким чином, щоб при сталих режимах результуюча ЕРС дорівнювала нулю. У перехідних режимах виникає сигнал, який визначається запізненням комутуючого потоку по відношенню до струму якоря, пропорційно якому проводиться підживлення струмом обмотки ДП.



1 – машина постійного струму; 2 – основна обмотка збудження додаткових полюсів; 3 – додаткова обмотка збудження додаткових полюсів; 4 – датчик частоти обертання; 5 – випрямляч; 6 – потенціометр; 7 – розмножувальний пристрій; 8 – реверсивний датчик струму; 9 – кероване реверсивне джерело постійного струму; 10 – потенціометр; 11 – функціональний перетворювач

Рисунок 1.7 – Принципова схема пристрою для автоматичного налаштування комутуючого поля в різних режимах машини постійного струму

Згадані пристрої вимагають, як правило, спеціальної мережі підвищеної частоти для живлення тиристорних перетворювачів, містять багато елементів, що знижують надійність і не знаходять застосування, в основному, з причини їх складності.

Розглянуті вище пристрої не забезпечують необхідних амплітуди і фази комутуючого магнітного потоку.

З метою забезпечення необхідного значення амплітуди і фази комутуючого магнітного потоку, який в достатній мірі повинен компенсувати дію вихрових струмів, пропонується новий схемно-конструкційний метод компенсації реакції вихрових струмів, практична реалізація якого захищена патентом [17]. Електричну схему форсованого збудження ДП з фазозміщуючим пристроєм наведено на рисунку 1.8.

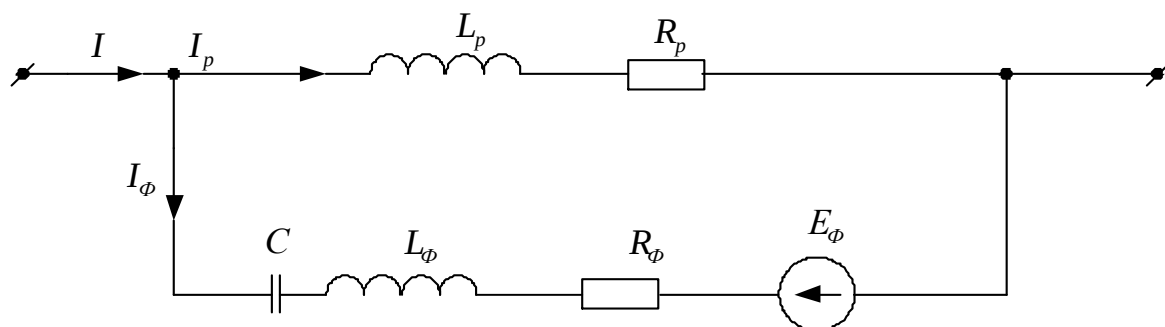


Рисунок 1.8 – Електрична схема форсованого збудження додаткових полюсів

Форсуюча обмотка може розташовуватися залежно від конструкції ДП ближче до остова або якоря, а також у крайніх пазах головних полюсів. При розташуванні ФО в пазах ГП вона охоплює осердя ДП і в своєму складі буде мати найбільшу кількість складових від взаємодії: з комутуючим потоком, із залишковим потоком розсіювання, від полів пазового розсіювання в місці розташування форсуючої обмотки. При розташуванні ФО на осерді ДП поблизу поверхні якоря спрощується конструкція магнітної системи машини при збереженні інших переваг запропонованого пристрою.

2 Проектування тягового електричного двигуна

Характеристики тягового двигуна:

- тип ТЕД – НБ-418К;
- серія електровоза – ВЛ80;
- тип струму – пульсуючий;
- напруга, $U = 950 \text{ В}$;
- номінальний струм, $I_a = 820 \text{ А}$;
- діаметр якоря, $D_a = 660 \text{ мм}$;
- кількість пазів якоря, $z = 87$;
- кількість колекторних пластин, $k = 348$;
- кількість активних провідників, $N = 696$;
- розмір міді обмотки якоря, $b_{\text{пр}} \times h_{\text{пр}} = 3,53 \times 6,9 \text{ мм}$;
- кількість полюсів, $2p = 6$;
- розмір паза якоря, $h_z, b_n = 10 \times 42,2 \text{ мм}$;
- довжина пакета якоря, $l_a = 385 \text{ мм}$;
- магнітний потік, $\Phi_n = 0,09 \text{ Вб}$;
- повітряний проміжок під головним полюсом, $\delta_m = 4,7 \text{ мм}$;
- повітряний проміжок під додатковими полюсами, $\delta_d = 7 \text{ мм}$.

2.1 Розрахунок активного шару якоря

Для тягового двигуна застосовуємо петльову обмотку якоря, яка має кількість паралельних гілок, рівну кількості полюсів:

$$2a = 2p,$$

де a – кількість пар паралельних гілок обмотки якоря, $a = 3$.

Кількість колекторних пластин визначаємо за формулою:

$$U_k = \frac{k}{z}, \quad (2.1)$$

$$U_k = \frac{348}{87} = 4.$$

Ширина зубцевого ділення на поверхні якоря:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_a}{z}, \quad (2.2)$$

$$t_1 = \frac{\pi \cdot 660}{87} = 23,820 \text{ мм.}$$

Лінійне навантаження якоря:

$$A = \frac{I \cdot N}{2a \cdot \pi \cdot D_a}, \quad (2.3)$$

$$A = \frac{820 \cdot 696}{6\pi \cdot 66.0} = 458,98 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

Щільність струму в провіднику обмотки якоря:

$$j = \frac{I_a}{2a \cdot g_a}, \quad (2.4)$$

де g_a – площа перерізу провідника.

$$g_a = v_{np} \cdot h_{np}, \quad (2.5)$$

$$g_a = (3,53 \cdot 6,9) = 24,35 \text{ мм}^2.$$

$$j_a = \frac{820}{6 \cdot 24,35} = 5,61 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Тепловий фактор:

$$A \cdot j_a = 458,98 \cdot 5,61 = 2575,35 \quad (2.6)$$

Це значення задовольняє нормам нагріву обмотки якоря. Реакція якоря на полюсному діленні.

$$F_{ря} = A \frac{\tau}{2}, \quad (2.7)$$

де τ – полюсне ділення по якорю.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p}, \quad (2.8)$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot 660}{6} = 345,4 \text{ мм}.$$

$$F_{ря} = 458,98 \cdot \frac{34,54}{2} = 7928,59 \text{ А}.$$

Параметри обмотки якоря.

Перший крок по реальних пазах:

$$y_{z1} = \frac{z}{2p} - \varepsilon_n, \quad (2.9)$$

де ε_n – укорочення обмотки в пазах ділення приймаємо $\varepsilon_n = 0,5$.

$$y_{z1} = \frac{87}{6} - 0,5 = 14$$

Другий крок у реальних пазах:

$$y_{z2} = \frac{-y_k}{U_k} + y_{z1}, \quad (2.10)$$

$$y_{z2} = \frac{-1}{4} + 14 = 13,75$$

Перший частковий крок по елементарних пазах (у колекторних ділянках):

$$y_1 = y_z \cdot U_k, \quad (2.11)$$

$$y_1 = 14 \cdot 4 = 56$$

Другий частковий крок по елементарних пазах (у колекторних ділянках):

$$y_2 = y_1 - y_k, \quad (2.12)$$

$$y_2 = 56 - 1 = 55$$

Крок по колектору:

$$y_k = 1.$$

Укорочення по колекторних пластинах:

$$\varepsilon_K = \varepsilon_n \cdot U_K, \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_K = 0,5 \cdot 4 = 2$$

Ширина паза в штампі:

$$\vartheta'_n = \vartheta_n + 0,2, \quad (2.14)$$

$$\vartheta'_n = 10 + 0,2 = 10,2 \text{ мм.}$$

Висота паза в штампі:

$$h'_z = h_z + 0,1, \quad (2.15)$$

$$h'_z = 42,99 + 0,1 = 42,2 \text{ мм.}$$

Відношення $\frac{h'_z}{\vartheta'_n}$:

$$\frac{h'_z}{\vartheta'_n} = \frac{42,2}{10,2} = 4,13 \quad (2.16)$$

Крок вирівнювачів по колектору:

$$Y_y = \frac{\kappa}{p}, \quad (2.17)$$

де κ – кількість колекторних пластин $\kappa = 348$;

p – кількість пар полюсів $p = 3$.

$$Y_y = \frac{348}{3} = 116 \text{ шт.}$$

Геометрія зубця така:

По поверхні якоря, ширина головки зубця:

$$e_{z1} = z_1 - e'_n, \quad (2.18)$$

$$e_{z1} = 23,820 - 10,2 = 13,62 \text{ мм.}$$

По дну пазів: зубцевий крок:

$$t = \frac{\pi \cdot (D_a - 2 \cdot h'_t)}{z}, \quad (2.19)$$

$$t = \frac{\pi \cdot (660 - 2 \cdot 42,2)}{87} = 20,774 \text{ мм.}$$

Ширина ніжки зубця:

$$e_{z2} = t_2 - e'_n, \quad (2.20)$$

$$e_{z2} = 20,774 - 10,2 = 10,574 \text{ мм.}$$

На одній третині висота паза: зубцевий крок:

$$z_{\frac{1}{3}} = \frac{\pi(D_a - \frac{4}{3}h'_z)}{z}, \quad (2.21)$$

$$z_{\frac{1}{3}} = \frac{\pi(660 - \frac{4}{3} \cdot 42,2)}{87} = 21,774 \text{ мм.}$$

Ширина зубця розрахункова:

$$e_{z_{\frac{1}{3}}} = z_{\frac{1}{3}} - e'_n, \quad (2.22)$$

$$e_{z_{\frac{1}{3}}} = 21,789 - 10,2 = 11,59 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт форми зубця:

$$K_z = \frac{z_{\frac{1}{3}}}{0,94 \cdot e_{z_{\frac{1}{3}}}} - 1, \quad (2.23)$$

$$K_z = \frac{21,789}{0,94 \cdot 11,59} - 1 = 1.$$

Таблиця 2.1 – Заповнення паза якоря

Параметр	Значення
Ширина	мм
Мідь	6,9
Ізоляція	2,85
Ширина паза в світлі, b_n	10
Припуск на штамповку	0,2
Ширина паза в штамі, b_n'	10,2
Висота	мм
Мідь	28,24
Ізоляція	7,36
Клин та прокладки (0,5*3)	4,0 + 1,5
Висота паза в світлі, h_z	42,1
Висота паза в штампі, h_z'	42,2
Відношення $\frac{h_z'}{b_n'}$	4,13

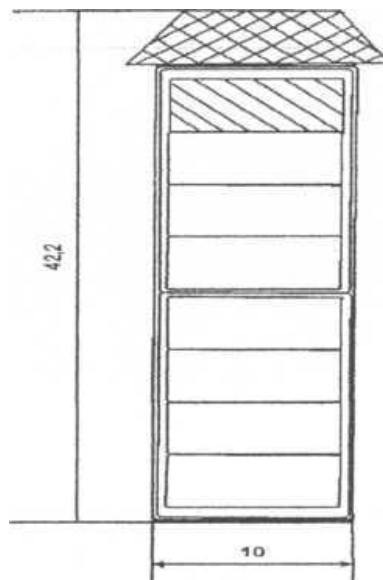


Рисунок 2.1 – Розташування котушки обмотки якоря в пазу

Заповнення паза.

Беремо $a = 25$ мм – прямолінійна ділянка котушки при виході ваза, $c = 3$ мм – прямолінійна ділянка у голівок з урахуванням радіуса вигину, $d = r + \frac{h_z}{2} = r + h_{кат} = 5 + \frac{42,2}{2} = 26$ мм. – розмір голівки котушки ($r = 5$ мм – внутрішній радіус вигину голівки), b – прямолінійна ділянка кінців проводів при підході до півників колектору. Якщо є можливість для введення в півники колектору здійснюється перекручування кінців проводів обертом на 90° – $b = 15 \pm 20$ мм; якщо доводиться вдаватися до розплющування кінців провідників, то $b = 40$ мм. Розплющування застосовують у тому випадку, коли колекторний розподіл по дну пазів виходить менше ширини провідника, як у нашому прикладі [1].

$$t_{2k} = \frac{\pi \cdot (D_a - 2h'_z)}{K}, \quad (2.24)$$

$$t_{2k} = \frac{\pi \cdot (660 - 2 \cdot 42,2)}{348} = 5,19 \text{ мм.}$$

Кут α , під яким розташовані похилі частини котушок:

$$\sin \alpha = \frac{b_k + \delta}{t_2}, \quad (2.25)$$

$$\sin \alpha = \frac{7,75 + 0,3}{20,7} = 0,37 \text{ мм.}$$

де $\delta = 0,3$ мм – найменший проміжок між сусідніми котушками;

$b_k = 7,75$ мм – товщина котушки в пазовій частині;

$t_2 = 20,7$ мм – зубцевий крок по найменшому діаметру укладання лобових частин обмотки.

Проекції похилих, косих ділянок котушки переднього l_n і заднього l_a на поздовжню вісь двигуна будуть дорівнювати:

$$l_n = \frac{y_{z2}}{2} \cdot t_2 \cdot \tan \alpha, \quad (2.26)$$

$$l_n = \frac{13,75}{2} \cdot 20,7 \cdot \tan 0,36 \cong 54,8 \text{ мм.}$$

$$l_a = \frac{y_{z1}}{2} \cdot t_2 \cdot \tan \alpha, \quad (2.27)$$

$$l_a = \frac{14}{2} \cdot 20,7 \cdot \tan 0,36 \cong 55,8 \text{ мм.}$$

Повні передні та задні вильоти лобових частин обмотки відповідно дорівнюють:

$$l_{\text{ВП}} = \alpha + l_n + b, \quad (2.28)$$

$$l_{\text{ВП}} = 25 + 54,8 + 40 = 119,8 \text{ мм.}$$

$$l_{\text{ВЗ}} = \alpha + l_a + c + d, \quad (2.29)$$

$$l_{\text{ВЗ}} = 25 + 55,8 + 3 + 26 = 110 \text{ мм.}$$

Сумарна довжина лобових вильотів обмотки якоря:

$$L_{\text{лоб}} = l_{\text{ВП}} + l_{\text{ВЗ}}, \quad (2.30)$$

$$L_{\text{лоб}} = 119,8 + 110 = 230 \text{ мм.}$$

З огляду на те, що верхній і нижній боки котушки розташовані на різних діаметрах, то, визнаючи їх довжини, зубцевий крок t' і кут нахилу α' , будемо вимірювати на діаметрі, що проходить через середину паза:

$$t' = \frac{\pi \cdot (D_a - h_z')}{z}, \quad (2.31)$$

$$t' = \frac{\pi \cdot (660 - 42,2)}{87} = 22,2 \text{ мм.}$$

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{b_k + \delta'}{t'}\right), \quad (2.32)$$

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{7,75 + 0,35}{22,2}\right) = 0,35 \text{ мм.}$$

де $\delta' = 0,35$ мм – проміжок між сусідніми котушками.

Отже, довжини переднього і заднього похилих ділянок рівні:

$$L_{\Pi} = \frac{Y_{z2}}{2} \cdot \frac{t'}{\cos \alpha'}, \quad (2.33)$$

$$L_{\Pi} = \frac{13,75}{2} \cdot \frac{22,2}{\cos 0,35} = 163,5 \text{ мм.}$$

Довжина лобової частини напіввитка:

$$l_{\text{лоб}} = b + L_{\Pi} + a + a + L_3 + c + \frac{\pi \cdot d}{2}, \quad (2.34)$$

$$l_{\text{лоб}} = 40 + 163,5 + 25 + 25 + 166,5 + 3 + \frac{\pi \cdot 26}{2} = 464 \text{ мм.}$$

Середня довжина одного провідника обмотки якоря:

$$l_N = l_{\text{лоб}} + l_a, \quad (2.35)$$

$$l_N = 464 + 380 = 844 \text{ мм} = 0,84 \text{ м.}$$

де $l_a = 380$ мм – довжина пакету осердя якоря.

Опір обмотки якоря при 20°C :

$$r_{a20^\circ} = \frac{l_N \cdot N}{57 \cdot g_a \cdot (2a)^2}, \quad (2.36)$$

$$r_{a20^\circ} = \frac{0,84 \cdot 696}{57 \cdot 24,35 \cdot (6)^2} = 0,0117 \text{ Ом.}$$

2.2 Розрахунок компенсаційної обмотки

Компенсаційну обмотку намагаються виконати за схемою з однією паралельною гілкою $a_{\text{ко}} = 1$, включаючи котушки всіх полюсів в одне послідовне коло [6].

Виходячи з того, що компенсаційна обмотка знищує спотворювальну дію намагнічуючої сили якоря на полюсній дузі і заданий ступінь компенсації $v_{\text{ко}} = 1,07 \div 1,17$, знаходимо число витків компенсаційної обмотки на полюс:

$$w_{\text{ко}} = v_{\text{ко}} \cdot \frac{A \cdot \frac{\tau}{2} \cdot a_\delta \cdot a_{\text{ко}}}{I_a}, \quad (2.37)$$

$$w_{\text{ко}} = 1,15 \cdot \frac{458,98 \cdot \frac{34,54}{2} \cdot 0,715 \cdot 1}{820} = 7,948 \text{ шт.}$$

Застосовуємо $W_{\text{ко}} = 8,0$. Обмотку виконуємо котушковою (секційною), розташовуючи в кожному пазі по одній активній стороні секції. Тоді число ефективних провідників в пазі $N_{\text{зко}}$ буде дорівнювати числу витків в секції W_{eko} . За умовою охолодження і рівномірності розподілу намагнічуючої сили

компенсаційної обмотки об'єм струму в пазі для великих і середніх машин повинен бути $I_{zko} \leq 1800 \div 2000$ А. Згідно:

$$N_{zko} = w_{eko} = \frac{I_{zko} \cdot a_{ko}}{I_{ko}}, \quad (2.38)$$

$$N_{zko} = \frac{1800 \cdot 1}{820} = 2,19 \text{ шт.}$$

Приймаємо $N_{zko} = W_{ko} = 2$. Оскільки число провідників на полюс дорівнює $2W_{ko}$, то число компенсаційних пазів дорівнює:

$$Z_{ko} = \frac{2 \cdot W_{ko}}{N_{zko}}, \quad (2.39)$$

$$Z_{ko} = \frac{2 \cdot 8}{2} = 8 \text{ шт.}$$

Застосовано таке виконання компенсаційної обмотки, коли вісі компенсаційних пазів паралельні вісі відповідного додаткового полюса, тому Z_{ko} повинно бути парним числом. Якщо число витків компенсаційної обмотки округлити до $W_{ko} = 9$ і розташувати їх при $N_{zko} = 3$ в шести пазах, $Z_{ko} = 3$, об'єм струму в пазі буде надзвичайно великим $I_a \times N_{zko} = 820 \times 3 = 2460$, а розподіл міжламельних напруг під головним полюсом стає менш сприятливим, ніж при заданому рішенні.

Щоб коливання магнітного струму не викликали вібрацій, необхідно:

$$Z_{ko} \neq (0,9 \div 1,1) \cdot \frac{Z}{2p} \cdot a_\delta, \quad (2.40)$$

що виконано:

$$8 \neq 1 \cdot \frac{87}{6} \cdot 0,715 = 10,36 \text{ А.}$$

Намагнічуюча сила компенсаційної обмотки на полюс:

$$F_{\text{ко}} = \frac{I_a}{a_{\text{ко}}} \cdot w_{\text{ко}}, \quad (2.41)$$

$$F_{\text{ко}} = \frac{820}{1} \cdot 8 = 6560 \text{ А.}$$

Ступінь компенсації:

$$\nu_{\text{ко}} = \frac{F_{\text{ко}}}{a_{\delta} \cdot F_{aq}} = \frac{w_{\text{ко}}}{a_{\delta} \cdot w'_a} = \frac{8}{0,715 \cdot 9,67} = \frac{6560}{0,715 \cdot 7928,6} = 1,15 \quad (2.42)$$

Щільність струму в компенсаційній обмотці допускається на 12-20 % вище, ніж в обмотці якоря. Вибираємо провідник 4,7×30 мм розрізом $q_{\text{ко}} = 140,14 \text{ мм}^2$.
Маємо:

$$j_{\text{ко}} = \frac{I_a}{a_{\text{ко}} \cdot q_{\text{ко}}}, \quad (2.43)$$

$$j_{\text{ко}} = \frac{820}{1 \cdot 140,14} = 5,85 \text{ А/мм}^2.$$

Геометричні розміри лобових частин компенсаційної обмотки беруться такі:
 $a = 25 \text{ мм}$ – довжина прямолінійної ділянки внутрішньої котушки при виході з паза;
 $b_{\text{пко}} = 11,4$ – ширина компенсаційного паза;
 $\Delta = 5 \text{ мм}$ – проміжок між кінцевими частинами сусідніх котушок.

Сумарна довжина переднього і заднього лобових вильотів:

$$L_{\text{лоб.ко}} = 2 \cdot \left[a + b_{\text{пко}} \cdot \Delta \cdot \left(\frac{z_{\text{ко}}}{2} - 1 \right) \right], \quad (2.44)$$
$$L_{\text{лоб.ко}} = 2 \cdot \left[25 + 11,4 \cdot \frac{8}{2} + 5 \cdot \left(\frac{8}{2} - 1 \right) \right] \cong 171 \text{ мм.}$$

Середню довжину витка визначаємо для середньої котушки. Довжина лобової

частини півоберта середньої котушки:

$$l_{SKO} = \tau_{KO} \cdot \left(1 - \frac{a_{\delta}}{2}\right) + 2a + b_{PKO} \cdot \frac{z_{KO}}{2} + \Delta \cdot \left(\frac{z_{KO}}{2} - 1\right), \quad (2.45)$$

$$l_{SKO} = 413 \cdot \left(1 - \frac{0,715}{2}\right) + 2 \cdot 25 + 11,4 \cdot \frac{8}{2} + 5 \cdot \left(\frac{8}{2} - 1\right) = 375,953 \text{ мм.}$$

Тут $\tau_{KO} \cdot \left(1 - \frac{a_{\delta}}{2}\right) = \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot \delta_{ГН} + h'_{ZKO})}{2p} \cdot (1 - 0,5 \cdot a_{\delta})$ – розгорнута довжина кінцевої ділянки лобової частини середньої котушки, яка взята по діаметру, який проходить через середини висот компенсаційних пазів.

Середня довжина оберту компенсаційної обмотки:

$$l_{cp.KO} = 2 \cdot (l_{SKO} + l_m), \quad (2.46)$$

$$l_{cp.KO} = (375,953 + 390) \cdot 2 = 1531,91 \text{ мм} = 1,531 \text{ м.}$$

Опір компенсаційної обмотки при температурі 20°C:

$$r_{KO} = \frac{2p \cdot w_{KO} \cdot l_{cp.KO}}{57 \cdot a_{KO}^2 \cdot q_{KO}}, \quad (2.47)$$

$$r_{KO} = \frac{6 \cdot 8 \cdot 1,53}{57 \cdot 1 \cdot 140,14} = 0,0092 \text{ Ом.}$$

Вага міді компенсаційної обмотки:

$$m_{MKO} = 8,9 \cdot l_{cp.KO} \cdot 2p \cdot w_{KO} \cdot q_{KO}, \quad (2.48)$$

$$m_{MKO} = 8,9 \cdot 1531,91 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 140,14 \cdot 10^{-6} = 91,711 \text{ кг.}$$

2.3 Розрахунок магнітного кола ТЕД

2.3.1 Ескіз магнітного кола

Розрахунок магнітного кола і креслення його ескізу (рисунок 2.2) робимо одночасно і в процесі проектування уточнюємо. При кресленні ескізу магнітного кола враховуємо таке [6]:

- при рівномірному повітряному проміжку розрахункова полюсна дуга буде на 5÷6% більше геометричної;

$$b_{\text{геом}} = \frac{b_{\delta}}{1,06} = \frac{a_{\delta}}{1,06} \cdot \tau, \quad (2.49)$$

$$b_{\text{геом}} = \frac{0,715}{1,06} \cdot 318,319 \text{ мм.}$$

- відстань між котушками головного та додаткових полюсів приймаємо не менш 8-10 мм;

- підріз головних катушок (при намотці на вузьке ребро) більше половини висоти катушки робити не рекомендується;

- відстань між немагнітним кутником, що підтримує катушку додаткового полюса, і якорем приймаємо 5 мм;

- між катушками та остовом розташовуємо запобіжні сталеві прокладки товщиною 0,5 мм;

- між катушками і осердям розташовуємо сталеві фланці товщиною 1 мм;

- катушки головних полюсів утримуються в затягнутому стані спеціальною пружинною рамкою, товщиною 4 мм, яка опирається на роги полюса: щоб не було зменшення корисного магнітного потоку через насичення рога полюса, розмір її приймаємо не менш сумарної ширини зубців, розташованих у розі полюсного наконечника;

- якщо шихтоване осердя додаткового полюса прикріплене до остова внутрішнім масивним стержнем, то для уникнення надмірного його насичення розмір f приймаємо не менш 10 мм.

Моторно-осьові підшипники тертя ковзання в остов врізаємо так, щоб розмір c був не менш 10-12 мм.

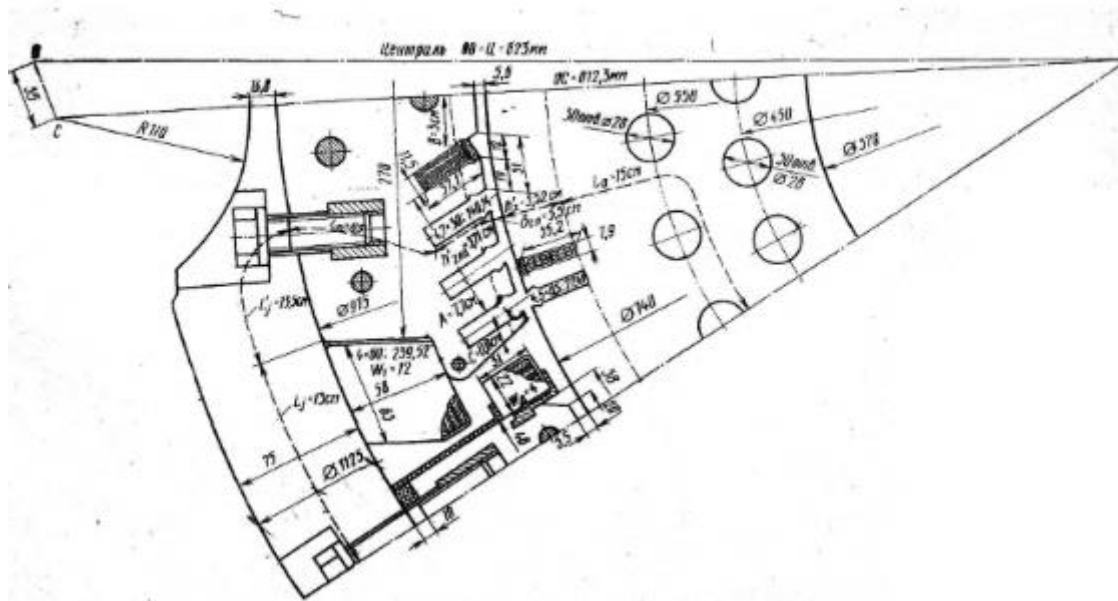


Рисунок 2.2 – Магнітне коло тягового двигуна НБ-418К

2.3.2 Розрахунок намагнічуючої сили головного полюса

Магнітне коло складається з окремих ланок: повітряного проміжку, зубців якоря, спинки осердя якоря, осердя головного полюса, зубцевого шару компенсаційної обмотки, остову у вигляді двох складових: основної і місце переходу із полюса в остов, стикування полюса з остовом [9].

Розрахунок магнітного потоку.

Магнітний потік визначаємо за формулою:

$$\Phi = \frac{U - \Delta U}{C_E \cdot n}, \quad (2.50)$$

де U – напруга на якорі ТВД в номінальному режимі;

ΔU – падіння напруги на активних опорах обмоток у полі якоря;

C_E – конструкційна стала.

$$C_E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}, \quad (2.51)$$

$$C_E = \frac{3 \cdot 696}{60 \cdot 3} = 11,6$$

Приймаємо: $(U - \Delta U) = E = 0,96 \cdot U$

де E – номінальне значення ЕРС обмотки якоря.

$$\Phi = \frac{0,96 \cdot 950 \cdot 60 \cdot 3}{675 \cdot 696 \cdot 3} = 0,116 \text{ Вб}. \quad (2.52)$$

2.3.3 Розрахунок шару зубців якоря.

Площа перерізу зубців якоря на висоті 1/3 від основи:

$$S_{z(1/3)} = \frac{e_{z1/3} \cdot z \cdot l_a \cdot \alpha_\delta \cdot 0,94}{2 \cdot p}, \quad (2.53)$$

де 0,94 – коефіцієнт заповнення сталлю, який враховує ізоляцію листів осердя.

$$S_{z(1/3)} = \frac{0,01159 \cdot 87 \cdot 0,38 \cdot 0,715 \cdot 0,94}{6} = 0,040 \text{ м}^2. \quad (2.54)$$

Розрахункова індукція в зубцях:

$$B_{z(1/3)} = \frac{\Phi}{S_{z(1/3)}}, \quad (2.55)$$

$$B_{z(1/3)} = \frac{0,085}{0,040} = 2,11 \text{ Тл.}$$

За таблицею 1.1 додаток 1 [6] знаходимо напруженість поля для індукції 2,11 Тл; $H_z = 495 \text{ А/см.}$

Довжина магнітного шляху в зубцях: $h'_z = 4,22 \text{ см.}$

Магнітна напруга зубців:

$$F_z = H_z \cdot h'_z, \quad (2.56)$$

$$F_z = 807 \cdot 4,31 = 3478,177 \text{ А.}$$

2.3.4 Розрахунок спинки якоря:

$$S_a = \frac{l_a \cdot 0,94 \cdot (D_a \cdot D_i - 2h'_z - \frac{4}{3} \cdot n_k \cdot d_k)}{2}, \quad (2.57)$$

де $D_i = 420 \text{ мм}$ – внутрішній діаметр якоря;

n_k – кількість рядів вентиляційних каналів;

$d_k = 0,020 \text{ м}$ – діаметр вентиляційного каналу.

$$S_a = \frac{0,385 \cdot 0,94 \cdot (0,66 - 0,42 - 2 \cdot 0,042 - \frac{4}{3} \cdot 2 \cdot 0,020)}{2} = 0,025 \text{ м}^2.$$

Магнітний потік в якорі роздвоюється, тому індукція в спинці якоря дорівнює:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot S_a}, \quad (2.58)$$

$$B_a = \frac{0,085}{2 \cdot 0,025} = 1,70 \text{ Тл.}$$

За таблицею напруженості для сталі якоря знаходимо напруженість [6]:

$$H_a = 75 \text{ А/см.}$$

Довжина магнітного шляху в спинці якоря (за ескізом) $L_a = 15 \text{ см.}$

Магнітне напруження спинки якоря:

$$F_a = H_a \cdot L_a, \quad (2.59)$$

$$F_a = 75 \cdot 15 = 1125 \text{ А.}$$

2.3.5 Розрахунок осердя полюса

Довжина осердя $l_m = 0,38 \text{ м,}$ ширина осердя $b_m = 0,27 \text{ м.}$

Площа перерізу осердя полюса:

$$S_m = b_m \cdot l_m \cdot 0,915, \quad (2.60)$$

$$S_m = 0,29 \cdot 0,98 \cdot 0,915 = 0,093 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнтом 0,915 врахуємо підріз полюса на торцях, який спричинений більшим радіусом закруглення при намотці міді котушки на вузьке ребро. Коефіцієнт розсіювання для полюса і остова $\sigma = 1,25.$

Індукція в осерді полюса:

$$B_m = \frac{\sigma \cdot \Phi}{S_m}, \quad (2.61)$$

$$B_m = \frac{1,25 \cdot 0,085}{0,093} = 1,14 \text{ Тл.}$$

Напруженість $H_m = 7,6 \text{ А/см}$ за таблицею 1.1 додатку 1 [6].

Довжина магнітної силової лінії $h_m = 8 \text{ см}$.

Магнітна напруга осердя головного полюса:

$$F_m = H_m \cdot h_m = 7,6 \cdot 6 = 45,6 \text{ А.} \quad (2.62)$$

2.3.6 Розрахунок магнітної напруги остова

Щоб насичення остова не сприяло насиченню магнітного кола додаткових полюсів, індукцію від головного потоку в остові не рекомендується допускати вище $1,4 \div 1,45 \text{ Тл}$ [6]. Магнітний шлях в остові ділимо на дві ділянки:

Ділянка виходу потоку з полюса в остов: товщина остова $h_j = 70 \text{ мм} = 0,07 \text{ м}$.

Довжина магнітного шляху:

$$L'_j = \frac{b_m}{2}, \quad (2.63)$$

$$L'_j = \frac{0,27}{2} = 0,135 \text{ м.}$$

Індукція у виході:

$$B_j' = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot S_j'} = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot h_j' (l_m + e_m)}, \quad (2.64)$$

$$B_j' = \frac{1,25 \cdot 0,085}{2 \cdot 0,07(0,38 \cdot 0,27)} = 1,18 \text{ Тл.}$$

По цій індукції, користуючись таблицею 2.3 додатку 1 [6], знаходимо напруженість $H_j' = 9,3 \text{ А/см.}$

Магнітна напруга ділянки виходу в остов:

$$F_j' = H_j' \cdot L_j', \quad (2.65)$$

$$F_j' = 9,3 \cdot 13,5 = 125,55 \text{ А.}$$

Ділянка між полюсами: товщина остова $h_j = 70 \text{ мм} = 0,07 \text{ м.}$

Індукція:

$$B_j = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2h_j \cdot l_j}, \quad (2.66)$$

$$B_j = \frac{1,25 \cdot 0,085}{2 \cdot 0,07 \cdot 0,74} = 1,03 \text{ Тл.}$$

Користуючись таблицею 2.3 додатку 1 [6], по цій індукції знаходимо напруженість $H_j = 6 \text{ А/см.}$

Довжина магнітного шляху $L_j = 15 \text{ см.}$

Магнітна напруга остову:

$$F_j = H_j \cdot L_j, \quad (2.67)$$

$$F_j = 6 \cdot 15 = 90 \text{ А.}$$

2.3.7 Розрахунок магнітної напруги зубчастого шару компенсаційної обмотки

Площа перерізу зубчастого шару:

$$S_{zko} = 2 \cdot (A + B + C - 2b_{\text{пко}}) l_m \cdot 0,97, \quad (2.68)$$

$$S_{zko} = 2(0,077 + 0,03 + 0,008 - 2 \cdot 0,0116) \cdot 0,39 \cdot 0,97 = 0,0698 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт розсіювання для цієї ділянки $\sigma_{\text{ко}} = 1,05$.

Індукція в осерді полюса:

$$B_{zko} = \frac{\sigma_{\text{ко}} \cdot \Phi}{S_{zko}}, \quad (2.69)$$

$$B_{zko} = \frac{1,05 \cdot 0,119}{0,0698} = 1,79 \text{ Тл.}$$

Напруженість $H_{zko} = 135 \text{ А/см}$. Довжина магнітної силової лінії $h_{zko} = 3,71 \text{ см}$.

Магнітна напруга зубчастого шару компенсаційної обмотки:

$$F_{zko} = H_{zko} \cdot h_{zko}, \quad (2.70)$$

$$F_{zko} = 135 \cdot 3,71 = 500 \text{ А.}$$

2.3.8 Розрахунок повітряного проміжку між якорем та полюсом

Індукція в повітряному проміжку:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}, \quad (2.71)$$

$$B_{\delta} = \frac{0,085}{0,715 \cdot 0,3454 \cdot 0,38} = 0,970 \text{ Тл.}$$

$$\text{де } l_{\delta} = \frac{l_a + l_m}{2} = \frac{0,385 + 0,38}{2} = 0,383 \text{ м.}$$

МРС повітряного проміжку знаходимо за формулою:

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta'', \quad (2.72)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$;

$\delta'' = \delta' \cdot \kappa'$ – приведений повітряний проміжок;

κ' – коефіцієнт який оцінює величину можливого збільшення повітряного проміжку внаслідок промислових допусків: при $\delta = 4 \text{ мм}$ приймаємо $\kappa' = 1,05$.

$$\kappa_{\delta} = \frac{t_1 + 10\delta}{e_{z1} + 10\delta}, \quad (2.73)$$

$$\kappa_{\delta} = \frac{23,8 + 10 \cdot 4,7}{13,62 + 10 \cdot 4,7} = \frac{70,8}{60,8} = 1,168$$

$$\delta'' = \delta \cdot \kappa_{\delta} \cdot \kappa' \quad (2.74)$$

$$\delta'' = 4 \cdot 1,168 \cdot 1,05 = 0,00576 \text{ м,}$$

$$F_{\delta} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,970 \cdot 5,76 \cdot 10^{-3} = 4451,64 \text{ А.}$$

У місці стику полюса з остовом вважаємо наявність щілини товщиною 0,01 см, тоді:

$$F_{\delta j} = 80 \cdot B_m, \quad (2.75)$$

$$F_{\delta j} = 80 \cdot 1,14 = 91,52 \text{ A.}$$

Загальна МРС:

$$F_0 = F_{\kappa O} + F_z + F_a + F_m + F_j + F_{\delta} + F_{\delta j}, \quad (2.76)$$

$$F_0 = 500 + 2088,9 + 1125 + 45,6 + 90 + 4451,64 + 91,52 = 7903 \text{ A.}$$

2.3.9 Магнітна характеристика ТЕД.

Магнітною характеристикою ТЕД є залежність $\Phi = f(F_0)$, для її побудови розраховуємо магнітне коло для різних значень магнітного потоку:

$$\frac{\Phi}{\Phi_n} = 0,5; 0,8; 1,0; 1,15.$$

Дані розрахунків $\Phi = f(F_0)$ заносимо в таблицю 2.2 і будуємо у вигляді графічної залежності на рисунку 2.2.

Таблиця 2.2 – Магнітна характеристика ТЕД

Φ/Φ_n	0,5	0,8	1,0	1,15
$\Phi, \text{Вб}$	0,043	0,069	0,086	0,099
F_0, A	4267	6828	8535	9815

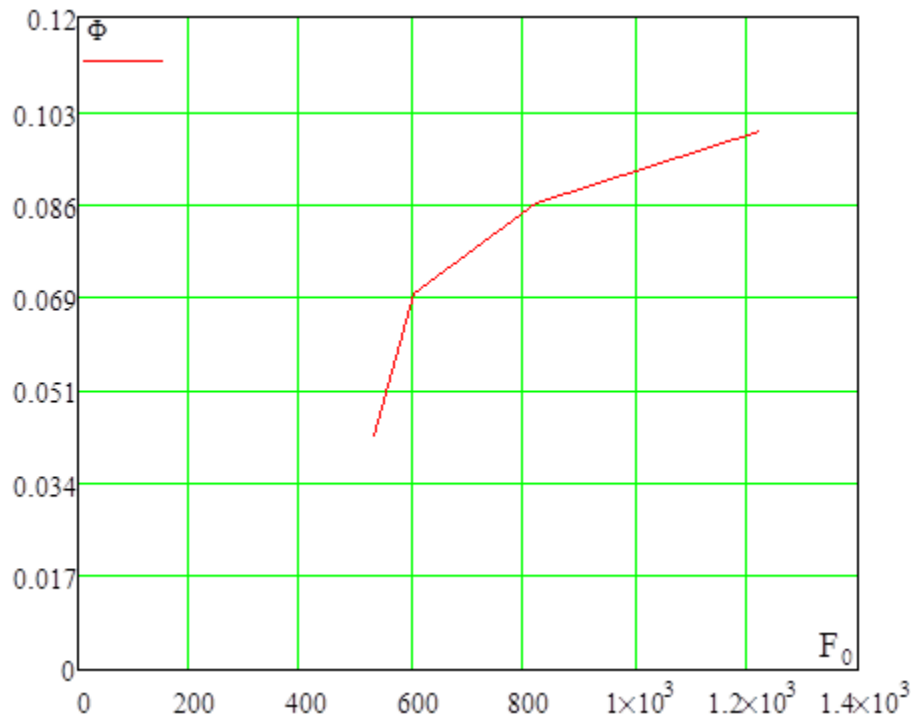


Рисунок 2.3 – Магнітна характеристика ТЕД

Повну МРС обмотки збудження знаходимо за формулою:

$$F_{зб} = F_0 + 0,05F_{ря} \quad (2.77)$$

де $F_{ря}$ – розмагнічуюча МРС поперечної реакції якоря.

$$F_{зб} = 8931 \text{ A}$$

Кількість витків обмотки збудження знаходимо за формулою:

$$\omega_{зб} = \frac{F_{зб}}{I \cdot \beta_n}, \quad (2.78)$$

де β_n – коефіцієнт постійної шунтування обмотки збудження ТЕД.

$$\omega_{зб} = 8931 / (820 \cdot 0,98) = 11,1$$

Приймаємо 11 витків обмотки збудження.

Коефіцієнт насичення:

$$K_n = \frac{F_{\delta\delta}}{F_{\delta}}, \quad (2.79)$$

$$K_n = 8931/4452 = 2$$

Котушку головного полюса виготовляють зі стандартної міді (4,1×32) мм перерізом $g_b = 131,2 \text{ мм}^2$.

Щільність струму:

$$j_{\delta} = \frac{I_a \cdot \beta_n}{g_{\delta}} \quad (2.80)$$

$$j_{\delta} = \frac{820 \cdot 0,99}{131,2} = 6,2 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

2.3.10 Розрахунок комутації та допоміжних полюсів

Як відомо, оптимальна комутація вимагає ретельного вибору обмотки якоря, величини полюсного перекриття, ширини електрощіток, обмежує значення перевантажень, швидкості обертання та інших.

При розрахунках комутації визначається ширина зони комутації – величини дуги на поверхні якоря, яку описує провідник обмотки в стані комутації [15].

$$b_{зк} = \pi D_a \left(u_k - \frac{a}{p} + \gamma + \varepsilon_k \right) / K \quad (2.81)$$

де γ – щіткове перекриття.

$$\gamma = \frac{b_{щ}}{t_k} \quad (2.82)$$

де $b_{щ}$ – ширина щітки;

t_k – колекторний поділ:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K} \quad (2.83)$$

$$t_k = \frac{\pi \cdot 520}{348} = 4,69 \text{ мм}$$

$$\gamma = \frac{25}{4,69} = 5,33$$

$$b_{зк} = 3,14 \cdot 0,66 \cdot (4 - 1 + 5,33 + 2) / 348 = 6,15 \text{ см}$$

Щільність струму:

$$j_{щ} = \frac{I_a}{g \cdot e_{щ} \cdot 3l_{щ}}, \quad (2.84)$$

де g – кількість щіток у щіткотримачі: $g = 3$;

l – довжина щітки: $l = 32 \text{ мм}$.

$$j_{щ} = \frac{820}{3 \cdot 2,5 \cdot 3 \cdot 3,2} = 11,939 \text{ А/см}^2$$

Другим і головним параметром комутації є середнє значення реактивної ЕРС:

$$e_p = \frac{\mu_0 \cdot 8 \cdot i_a \cdot u_k \cdot w_c^2 \cdot l_a \cdot \lambda \cdot V_k}{t_k \left(u_k - \frac{a}{p} + \gamma + \varepsilon_k \right)} \quad (2.85)$$

де i_a – струм паралельної гілки обмотки якоря;

$W_c = 1$ – кількість витків секції;

V_k – лінійна швидкість на поверхні колектору;

t_k – колекторний поділ;

λ – відносне значення магнітної провідності потоків розсіювання, які зчеплені з комутуючими секціями;

$$i_a = \frac{I_a}{2a} \quad (2.86)$$

$$i_a = 820/6 = 136,6 \text{ A}$$

$$V_k = \frac{\pi D_k \cdot n}{60} \quad (2.87)$$

$$V_k = \frac{3,14 \cdot 0,52 \cdot 915}{60} = 24,9 \text{ м/с}$$

$$\lambda = \lambda_{n1} + \lambda_{n2} + \lambda_k + \lambda_n \quad (2.88)$$

λ_{n1} – магнітна провідність шляху потоку розсіювання для частини паза над міддю;
 λ_{n2} – магнітна провідність шляху потоку розсіювання для частини паза, що зайнята міддю секцій;

λ_k – магнітна провідність шляху потоку розсіювання по коронках зубців;

λ_n – магнітна провідність шляху потоку розсіювання лобових частин обмотки.

$$\lambda_{n1} = K_{\text{банд.}} \cdot \frac{h_1}{b_n''} \quad (2.89)$$

h_1 – висота, що визначається сумою товщини клина, підкладки під ним та ізоляцією зверху до міді

$$h_1 = 4 + 2 \cdot 0,3 + 0,1 \cdot 1 + 0,05 \cdot 2 \cdot 4 + 0,05 \cdot 2 \cdot 1 = 5,2 \text{ мм}$$

b_n'' – ширина паза над міддю обмотки

$$b_n'' = b_n' + 1,74 \quad (2.90)$$

b_n' – ширина паза у штампі

$$b_n'' = 10,2 + 1,74 = 11,94 \text{ мм}$$

$K_{\text{банд}} = 1$ (при немагнітних бандажах)

$$\lambda_{n1} = 1 \cdot 5,2 / 11,94 = 0,435$$

Для частини паза зайнятого міддю:

$$\lambda_{n2} = K_i \cdot \frac{h_2}{3b_n'} \quad (2.91)$$

h_2 – висота паза, зайнятого міддю

$$h_2 = 42,2 - 5,2 - 0,3 - 0,1 - 0,05 \cdot 2 \cdot 4 - 0,05 \cdot 2 \cdot 1 = 36,1$$

k_i – коефіцієнт, що враховує зменшення потоку розсіювання в процесі комутації в верхній частині провідників, визначається в залежності від приведеної висоти провідника. Коефіцієнт k_i знаходимо по кривій $k_i(\xi)$ залежно від величини ξ [6].

$$\xi = h_{np} \sqrt{\frac{b_m \cdot \omega \cdot \lambda_m \cdot \mu_0}{b_n' \cdot 2}} \quad (2.92)$$

де h_{np} – висота елементарного провідника, м;

$b_m = 6,9$ мм; $b_n' = 10,2$ мм – ширина міді в пазі та паза в штампі (в однакових одиницях);

ω – колова частота;

$\lambda = 38 \cdot 10^6$ – питома провідність міді при очікуваній температурі, См/м.

$$\omega = 2\pi f' \quad (2.93)$$

$$f' = \frac{V_k}{2t_k(u_k + \gamma - \frac{a}{p})} \quad (2.94)$$

$$f' = \frac{24,9}{2 \cdot 4,69 \cdot 10^{-3} (4 - 1 + 5,33)} = 318 \text{ Гц}$$

$$\xi = 0,00353 \sqrt{\frac{0,0069 \cdot 2\pi \cdot 318 \cdot 38 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{0,001 \cdot 2}} = 2,02$$

За рис. 2.32 [8] можна приймати, що $k_i = 0,8$

$$\lambda_{n2} = 0,8 \cdot 36,1 / (3 \cdot 10,2) = 0,936$$

Провідність по коронках зубців:

$$\lambda_k = \frac{b_d}{4 K_{\delta_d} \cdot \delta_d} \quad (2.95)$$

де K_{δ_d} – коефіцієнт повітряного проміжку;

$b_d \approx 1,5t_1 \approx 54$ мм – ширина наконечника додаткового полюса.

$$K_{\delta_d} = \frac{t_1 + 10\delta_o}{e_{z1} + 10\delta_o}, \quad (2.96)$$

δ_d – величина першого повітряного проміжку, дорівнює 10 мм

$$K_{\delta_d} = \frac{23,82 + 10 \cdot 10}{13,62 + 10 \cdot 10} = 1,12$$

$$\lambda_k = 0,054 / (4 \cdot 1,12 \cdot 0,01) = 1,74$$

Провідність лобових частин при немагнітних бандажах:

$$\lambda_n = 0,465 \cdot \frac{l_n}{l_a} \cdot \ell g \left(1 + \frac{\pi \cdot \tau}{4 \cdot h_z} \right), \quad (2.97)$$

де $l_n = 44,9$ см – сумарна довжина передньої та задньої лобових частин секцій, яку беруть із геометричного розрахунку секцій.

$$\lambda_n = 0,465 \cdot \frac{44,9}{385} \cdot \ell g \left(1 + \frac{\pi \cdot 34,54}{4 \cdot 4,22} \right) = 0,47$$

$$\lambda = 0,435 + 0,936 + 1,74 + 0,47 = 3,581$$

$$e_p = \frac{12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 136,6 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 0,385 \cdot 3,581 \cdot 24,9}{4,69 \cdot 10^{-3} \cdot 10,33} = 4,24 \text{ В}$$

Індукція в першому повітряному проміжку:

$$B_d = \frac{e_p}{2 \cdot w_c \cdot l_d \cdot V_a} \quad (2.98)$$

де V_a – колова швидкість якоря;

l_d – довжина осердя додаткового полюса.

$$V_a = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n}{60} \quad (2.99)$$

$$V_a = \frac{\pi \cdot 0,66 \cdot 915}{60} = 31,6 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$B_d = 4,24 / (2 \cdot 1 \cdot 0,38 \cdot 31,6) = 0,174 \text{ Тл}$$

Магнітна напруга першого повітряного проміжку:

$$F_{\delta_d} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_d \cdot \delta_d \cdot k_{\delta_d} \cdot K' \quad (2.100)$$

де $K' = 1,03$ – коефіцієнт можливого збільшення повітряного проміжку внаслідок виробничих допущень при $\delta_d = 10$ мм.

$$F_{\delta_d} = 0,174 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 1,12 \cdot 1,03 / (12,56 \cdot 10) = 1598 \text{ А}$$

Магнітний потік в зоні комутації

$$\Phi_k = B_d \cdot l_d \cdot b_d \quad (2.101)$$

$$\Phi_k = 0,174 \cdot 0,38 \cdot 0,046 = 0,003 \text{ Вб}$$

Коефіцієнт розсіювання допоміжного полюса:

$$\sigma_{mд} = 1 + \frac{F_{\text{ря}} + F_{\delta_d}}{B_d (\epsilon_d + 3\delta_d)} \cdot \lambda_{сд} \cdot \frac{l_a + l_{mд}}{2l_a}, \quad (2.102)$$

де $\lambda_{сд}$ – провідність шляху потоку розсіювання;

$S = 4$ см – відстань між наконечниками головного та допоміжного полюсів;

$h_{mд} \approx 11,0$ см – місце, яке займає мідь по висоті допоміжного полюса;

$l_{mд} = 38$ см – довжина осердя допоміжного полюса в осьовому напрямку.

$$\lambda_{сд} = \mu_0 \frac{0,8 h_{mд}}{S} \cdot \frac{(l_a + l_{mд})}{2} \quad (2.103)$$

$$\lambda_{\sigma_d} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{0,8 \cdot 0,11}{0,04} \cdot \frac{(0,385 + 0,38)}{2} = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

$$\sigma_{m_d} = 1 + \frac{7928+1598}{0,174(0,046+3 \cdot 0,007)} \cdot 1,06 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,385+0,38}{2 \cdot 0,385} = 1,87$$

Магнітний потік в осерді допоміжного полюса:

$$\Phi_{m_d} = \sigma_{m_d} \cdot \Phi_k \quad (2.104)$$

$$\Phi_{m_d} = 1,87 \cdot 0,003 = 0,0056 \text{ Вб}$$

Індукція в осерді допоміжного полюса:

$$B_{m_d} = \frac{\Phi_{m_d}}{S_{m_d}} \quad (2.105)$$

де S_{m_d} – площа перерізу осердя допоміжного полюса:

$$S_{m_d} = l_{m_d} \cdot b_{m_d} \cdot k_c \quad (2.106)$$

$$S_{m_d} = 0,38 \cdot 0,046 \cdot 0,94 = 0,01643 \text{ м}^2$$

$$B_{m_d} = 0,0056 / 0,01643 = 0,34 \text{ Тл}$$

Магнітна напруга другого проміжку

$$F_{\delta_j} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{m_d} \cdot \delta_j \cdot \frac{b_{m_d}}{b_{m_d} + 2\delta_j} \quad (2.107)$$

де δ_j – величина другого проміжку, дорівнює 7 мм;

$$F_{\delta_j} = \frac{1}{12,56 \cdot 10^{-7}} \cdot 0,34 \cdot 0,007 \cdot \frac{0,046}{0,046 + 2 \cdot 0,007} = 1452 \text{ А}$$

Повна МРС допоміжного полюса:

$$F_D = F_{\delta_D} + F_{\delta_j} + (F_{\text{ря}} - F_{\text{ко}}) \quad (2.108)$$

$$F_D = 1528 + 1452 + (7928 - 4920) = 6058 \text{ A}$$

Кількість витків котушки допоміжного полюса:

$$w_D = \frac{F_D}{I_a}, \quad (2.109)$$

$$w_D = \frac{6058}{820} = 7,38$$

Приймаємо 8 витків котушки допоміжного полюсу.

Котушки допоміжного полюса виготовляють зі стандартної міді (4,4×28) мм перерізом $g_D = 146,5 \text{ мм}^2$.

Щільність струму в обмотці допоміжного полюса:

$$j_D = \frac{I_a}{g_D}, \quad (2.110)$$

$$j_D = \frac{820}{146,55} = 5,6 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}.$$

Коефіцієнт компенсації реакції якоря:

$$\nu = \frac{F_D + F_{\text{ко}}}{F_{\text{ря}}} \quad (2.111)$$

$$\nu = \frac{6058 + 4920}{7928} = 1,15$$

2.4 Визначення характеристик ТЕД

2.4.1 Навантажувальна характеристика

Навантажувальна характеристика є залежність: $\frac{E}{n} = f(I_{зб})$.

Для знаходження навантажувальної характеристики користуємося формулою:

$$\frac{E}{n} = C_E \cdot \Phi \quad (2.112)$$

За формулою 2.51 C_E дорівнює 11,6, тоді

$$\frac{E}{n} = 11,6 \Phi.$$

Залежність загальної МРС $F_{зб}$ від струму збудження знаходимо за формулою:

$$F_{зб} = I_{зб} \cdot W_{зб} = I_{зб} \cdot 11 \quad (2.113)$$

Навантажувальні характеристики визначаються для струмів: 0,5; 0,8; 1,0; 1,15 I_n . Дані розрахунків заносимо до таблиці 2.2 та будуємо у вигляді графіку (рисунок 2.4).

Таблиця 2.2 – Навантажувальна характеристика

$I_{зб}, A$	0	$0,5 \cdot I_n$	$0,8 \cdot I_n$	$1,0 \cdot I_n$	$1,15 \cdot I_n$
	0	410	656	820	943
$F_{зб}, A$	0	4510	7216	9020	10373
$\Phi, Tл$	0	0,0043	0,07	0,085	0.1
$\frac{E}{n}$	0	0,4988	0,812	1,0092	1,16

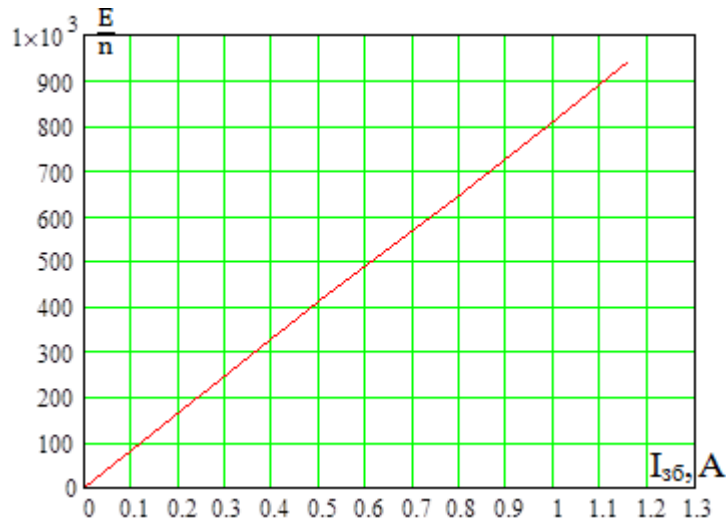


Рисунок 2.4 – Навантажувальна характеристика

2.4.2 Швидкісна характеристика

Швидкісна характеристика $n = f(I)$ розраховується при незмінній напрузі на якорі ТЕД за формулами:

$$n = \frac{U - (I \cdot \sum r + 2)}{C_E \cdot \Phi} \quad (2.114)$$

де 2 – падіння напруги в щітковому контакті, дорівнює 2 В;

$\sum r$ – сумарний опір обмоток двигуна.

C_E – конструкційна стала, дорівнює 11,6.

$$\sum r = r_a + \beta \cdot r_{зб} + r_{дн} + r_{ко} \quad (2.115)$$

де r_a – опір обмотки якоря;

$r_{зб}$ – опір обмоток збудження;

$r_{дн}$ – опір обмотки допоміжних полюсів;

$r_{ко}$ – опір компенсаційної обмотки.

Опір обмотки якоря визначено за формулою 2.36, r_a дорівнює 0,0117 Ом.

$$r_{зб} = 2p \cdot \frac{l_{ip\epsilon} \cdot W_{зб}}{57 \cdot g_{зб} \cdot 0,85}, \quad (2.116)$$

де 0,85 – коефіцієнт, який враховує підріз граней котушки;

$$\frac{1}{57} = 0,0175 \text{ Ом} \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}. \text{ – питомий опір міді при } 20^\circ\text{C}.$$

$l_{сер \epsilon}$ – середня довжина витка котушки, мм.

$$l_{сер \epsilon} = 2[(l_m + 20) + (\epsilon_m + 10)] + 2\pi r, \quad (2.117)$$

де $r = \frac{70}{2} = 35 \text{ мм}$ – радіус закруглення котушки на кутах, прийнятих з рисунка

котушки, ширина якої 70 мм.

$$l_{сер \epsilon} = 2[(380 + 20) + (270 + 10)] + 2\pi \cdot 35 \approx 1579,8 \text{ мм} \approx 1,58 \text{ м}$$

$$r_{зб} = 6 \cdot \frac{1,58 \cdot 11}{57 \cdot 131,2 \cdot 0,85} = 0,0164 \text{ Ом}$$

$$r_d = 2p \frac{l_{сер д} \cdot W_d}{57 \cdot g_d} \quad (2.118)$$

де $l_{сер д}$ – середня довжина котушки допоміжних полюсів

$$l_{сер д} = 2 l_d + \pi(\epsilon_d + \epsilon_{кот}) \quad (2.119)$$

$$l_{сер д} = 2 \cdot 380 + \pi(46 + 22) = 973,52 \text{ мм} = 0,973 \text{ м}$$

$$r_d = \frac{6 \cdot 0,973 \cdot 8}{57 \cdot 146,5} = 0,0056 \text{ Ом}$$

Опір компенсаційної обмотки визначено за формулою 2.47, дорівнює 0,0092 Ом.

Сумарний опір обмоток тягового двигуна при повному та послабленому полі складає:

$$\sum r(0,98) = 0,0117 + 0,98 \cdot 0,0164 + 0,0056 + 0,0092 = 0,029 \text{ Ом}$$

$$\Sigma r(0,32)=0,0117+ 0,32 \cdot 0,0164+0,0056+0,0092=0,0317 \text{ Ом}$$

Швидкісну характеристику розраховуємо для значень $\beta = 0,98$ і $\beta = 0,32$. Дані розрахунків заносимо до таблиці 2.3 та будуємо у вигляді графіка (рисунок 2.5).

Таблиця 2.3 – Швидкісна характеристика

I		0	$0,5 \cdot I_H$	$0,8 \cdot I_H$	$1,0 \cdot I_H$	$1,15 \cdot I_H$
$\beta=0,98$	$I_a, \text{ A}$	0,00	379,25	606,8	758,5	872,275
	$n, \text{ об/хв.}$	∞	1838,11	1129,11	908,482	790,379
$\beta=0,32$	$I_a, \text{ A}$	0,00	131,2	209,92	262,4	301,76
	$n, \text{ об/хв.}$	∞	1857,82	1141,23	918,232	798,862

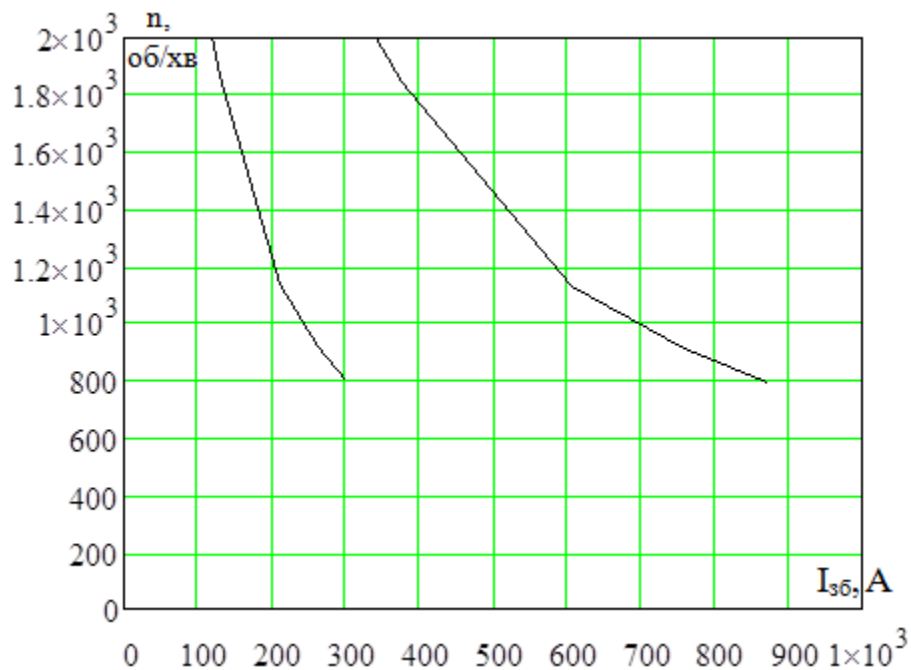


Рисунок 2.5 – Швидкісна характеристика

2.4.3 Характеристика ККД

Значення ККД ТЕД визначаємо за формулою:

$$\eta = \frac{U \cdot I - \sum \Delta P}{U \cdot I} = P_1 \cdot \left(1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1}\right) \quad (2.120)$$

де P_1 – підведена потужність до ТЕД;

$\sum \Delta P$ – втрати потужності в ТЕД.

$$P_1 = U \cdot I \quad (2.121)$$

$$P_1 = 950 \cdot 820 = 779 \text{ кВт}$$

$$\sum \Delta P = I^2 \sum r + 2I + P_{\text{доо}} + P_0, \quad (2.122)$$

де $I^2 \sum r$ – джоулеві втрати потужності на опорах обмоток електричного кола якоря;

$2I$ – втрати потужності в перехідному колі щіток;

$P_{\text{доо}}$ – додаткові втрати потужності, рівні $0,05 P_1$;

P_0 – втрати потужності без навантаження.

$$P_0 = P_{\text{см}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{підш}} \quad (2.123)$$

де $P_{\text{см}}$ – магнітні втрати в двигуні при ХХ;

$P_{\text{щ}}$ – втрати на тертя щіток;

$P_{\text{підш}}$ – механічні втрати в підшипниках.

Магнітні втрати в двигуні при ХХ:

$$P_{\text{см}} = 2,5 \cdot (m_a p_a + m_z p_z), \quad (2.124)$$

де m_a, p_a та m_z, p_z – відповідно маси та питомі втрати в спинці та зубцях якоря.

$$p_a = [0,044f + 5,6 \cdot (\frac{f}{100})^2] \cdot B_a^2 \quad (2.125)$$

де f – частота перемагнічування осердя якоря:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (2.126)$$

$$f = 3 \cdot 915 / 60 = 45,7 \text{ Гц}$$

$$p_a = [0,044 \cdot 45,7 + 5,6 \cdot (\frac{45,7}{100})^2] \cdot 1,7^2 = 9,175 \text{ Вт/кг}$$

$$p_z = [0,044f + 5,6 \cdot (\frac{f}{100})^2] \cdot B_z^2 \quad (2.127)$$

$$p_z = [0,044 \cdot 45,7 + 5,6 \cdot (\frac{45,7}{100})^2] \cdot 2,11^2 = 14,12 \text{ Вт/кг}$$

$$m_a = \frac{\pi}{4} [(D_a - 2 \cdot h_z)^2 - D_i^2 - m_k \cdot d_k^2] \cdot l_a \cdot k_c \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} \quad (2.128)$$

де m_k – кількість вентиляційних каналів;

d_k – діаметр вентиляційного каналу.

$$m_a = \frac{\pi}{4} [(66 - 2 \cdot 4,22)^2 - 42^2 - 44 \cdot 3^2] \cdot 38,5 \cdot 0,94 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 256 \text{ кг}$$

$$m_z = \frac{\pi}{4} [D_a^2 - (D_a - 2 \cdot h_z)^2] - Z \cdot b_{\pi} \cdot h_z] \cdot l_a \cdot k_c \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} \quad (2.129)$$

де Z, b_{π}, h_z – відповідно кількість зубців якоря, ширина паза, висота паза.

$$m_z = \frac{\pi}{4} [66^2 - (66 - 2 \cdot 4,22)^2] - 87 \cdot 1 \cdot 4,22] \cdot 38,5 \cdot 0,94 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 150 \text{ кг}$$

$$P_{cm} = 2,5(9,175 \cdot 256 + 14,12 \cdot 150) = 11167 \text{ Вт}$$

Втрати на тертя в щітках:

$$P_{щ} = 9,81 \cdot \sum S_{\text{щ}} \cdot \rho_{щ} \cdot v_k \cdot \rho, \quad (2.130)$$

де $S_{щ}$ – загальна площа всіх щіток;

$p_{щ}$ – тиск на щітку, приймаємо 0,4 кгс/см²;

v_k – колова швидкість колектора;

p – коефіцієнт тертя щіток по колектору, приймаємо 0,1 (для щіток ЕГ-61А).

$$\sum S_{щ} = 3l_{щ}e_{щ} \cdot 2g, \quad (2.131)$$

$$\sum S_{щ} = 3 \cdot 2,5 \cdot 3,2 \cdot 6 = 144 \text{ см}^2$$

$$P_{щ} = 9,81 \cdot 144 \cdot 0,4 \cdot 0,1 \cdot 24,9 = 1406,9 \text{ Вт.}$$

Механічні втрати в підшипниках:

$$P_{підш} = 0,002 \cdot U \cdot I_n \quad (2.132)$$

$$P_{підш} = 0,002 \cdot 950 \cdot 820 = 1558 \text{ Вт}$$

Дані розрахунків заносимо в таблицю 2.4 і будуємо у вигляді графіка (рисунок 2.6).

Таблиця 2.4 – Характеристика ККД

I		0,5·I _н	0,8·I _н	1,0·I _н	1,15·I _н
P ₁ , Вт		389500	623200	779000	895850
$\beta=0,98$	$\Sigma \Delta P$, Вт	58807,9	6924,9	78791,3	87277,6
	η	0,849	0,883	0,899	0,903
$\beta=0,32$	$\Sigma \Delta P$, Вт	56790,7	64100,8	70722,5	76606,6
	η	0,854	0,897	0,909	0,914

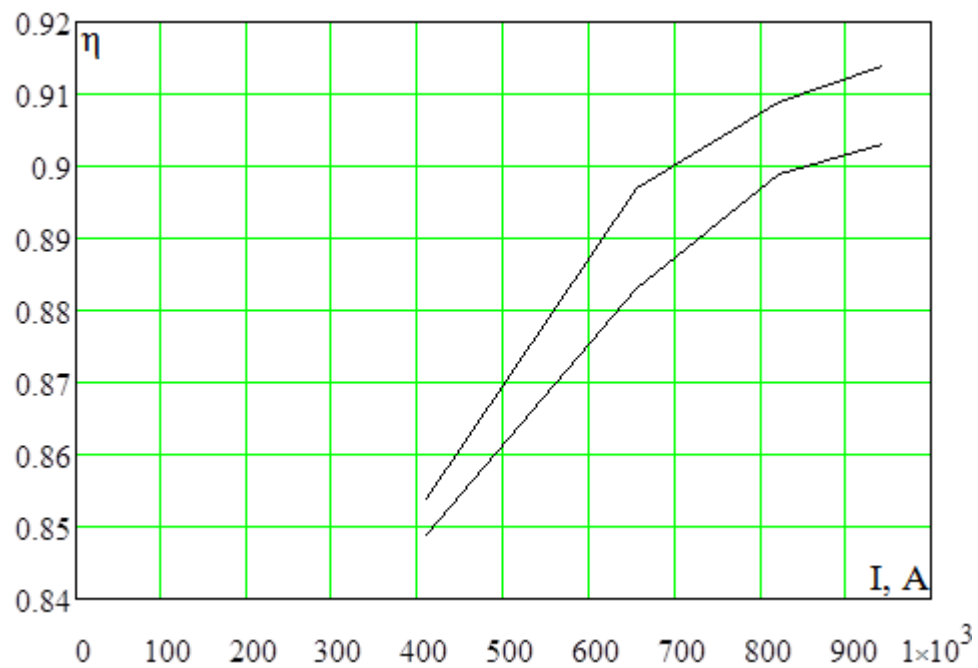


Рисунок 2.6 – Характеристики ККД

2.4.4 Моментна характеристика

Моментну характеристику $M = f(I)$ визначаємо за формулою:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I \quad (2.133)$$

де C_M – машинна стала для моменту: $C_M = 9,54C_E$

Дані розрахунків заносимо в таблицю 2.5 і будуємо у вигляді графіка (рисунок 2.7).

Таблиця 2.5 – Моментна характеристика

I	$0,5 \cdot I_H$	$0,8 \cdot I_H$	$1,0 \cdot I_H$	$1,15 \cdot I_H$
$M(\beta=0,98)$	3451,42	5782,44	7309,36	8443,17
$M(\beta=0,32)$	3471,74	5834,48	7309,67	8546,02

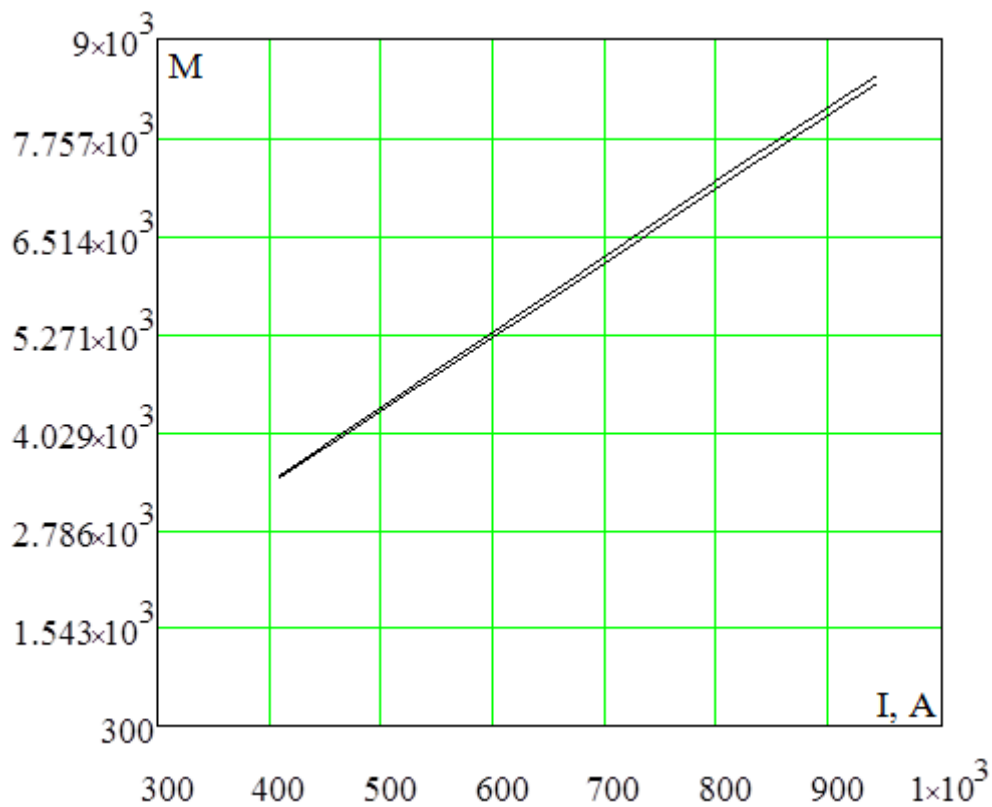


Рисунок 2.7 – Моментна характеристика

2.4.5 Механічна характеристика

Механічну характеристику $n = f(M)$ визначаємо за формулою:

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_1}{n} \cdot \eta \quad (2.134)$$

Дані розрахунків заносимо в таблицю 2.6 і будуємо у вигляді графіка (рисунок 2.8).

Таблиця 2.6 – Механічна характеристика

M	0	2848,67	5697,34	8546,02
n ($\beta=0,98$)	953,125	844,519	684,251	627,308
n ($\beta=0,32$)	953,125	878,816	804,501	730,197

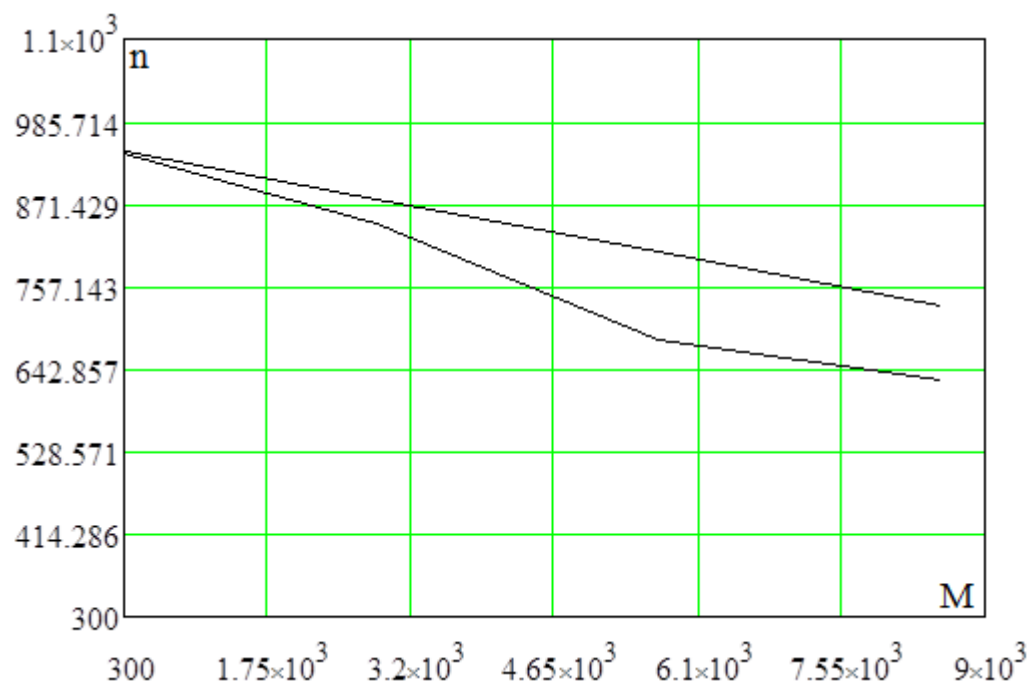


Рисунок 2.8 – Механічна характеристика

3 Спеціальна частина

3.1 Методи оптимального проектування магнітної системи тягових двигунів для роботи при пульсуючому живленні

Оптимальний вибір параметрів магнітного кола тягового двигуна (ТЕД) визначає як якість процесу комутації, так і якість самої магнітної системи. Основи якості ТЕД закладаються при проектуванні, тому створення ефективної розрахункової бази визначення оптимального пристрою магнітного ланцюга ТЕД є очевидним [1].

Розрахунок магнітного ланцюга ТЕД заснований на методі схем заміщення магнітного ланцюга. Порівняно з відомими методами розрахунку магнітних полів в електричних машинах метод схем заміщення магнітного ланцюга має переваги, серед яких: наочність його результатів, простота схеми та її мобільність. Ділянки, що нас цікавлять, можна досліджувати детально (розподіл потоків у проміжках, потоків розсіювання та ін.) нескладною модифікацією схеми заміщення.

Отже, метод схем заміщення покладений в основу базових розрахунків ТЕД. Схема заміщення магнітного ланцюга ТЕД представлена на рисунку 3.1. Вона містить джерела МДС F , що представляють дії відповідних обмоток, і магнітні провідності: Y -лінійні для ділянок повітряних проміжків і шляхів розсіювання та нелінійні для сталевих ділянок магнітопроводу.

Схема наочно прив'язана до реальної магнітної системи, приведеної до двохполюсного виду. Рішення схеми (рисунок 3.1) дозволяє не тільки оцінювати правильність вибору відповідних обмоток, визначення коефіцієнтів розсіювання полюсів та ін., але й досліджувати явища магнітної асиметрії пліч якоря і станини, що впливає на якість комутації і розбіжність меж безіскрової роботи ТЕД при регулюванні частоти обертання:

- розрахунку процесу власне комутації і визначення струмів у комутуючих секціях з урахуванням взаємного впливу їх з полем у проміжку під додатковим

полюсом (ДП). Для докладного дослідження цього процесу зона повітряного проміжку ДП – якір представляється збільшеним до необхідної точності числом галузей схеми;

- розрахунку перехідних процесів, зв'язаних із форсованими, гальмовими чи режимами живленням ТЕД від пульсуючого струму. Ці режими пов'язані з демпфуванням вихровими струмами в масивних ділянках магнітопроводу потоків допоміжних чи головних полюсів. Облік демпфування виробляється введенням у схему (рисунок 3.1) джерел МДС вихрових струмів чи їхньою заміною відповідними падіннями МДС на нелінійних провідностях, зумовлених дією вихрових струмів.

Отже, актуальність створення ефективного способу рішення схеми заміщення є незаперечним. З огляду на те, що схема (рисунок 3.1) містить нелінійні елементи, процес її рішення є ітераційним. В основу одного циклу ітерацій може бути покладений, наприклад, метод вузлових потенціалів [4].

Визначення нелінійних провідностей (ділянки якоря, остову, полюсів у схемі виробляється за відомою формулою):

$$y = \mu \frac{S}{l} 10^{-8}, \quad (3.1)$$

де μ – магнітна проникність;

S – площа поперечного перерізу;

l – довжина ділянки.

Джерела схеми представлені МРС відповідних обмоток якоря F_a , F_d , порушення F_r . Коефіцієнти розподілу в міжполюсному вікні k_{pi} для i -тої ділянки схеми визначаються відносною величиною МДС відповідної обмотки, що приходить на i -ділянку.

Провідності лінійних елементів (шляхів розсіювання, повітряних проміжків) можуть бути визначені або побудовою трубок провідності, або методом конформних відображень, заснований на перетворенні Кристофеля-Шварца.

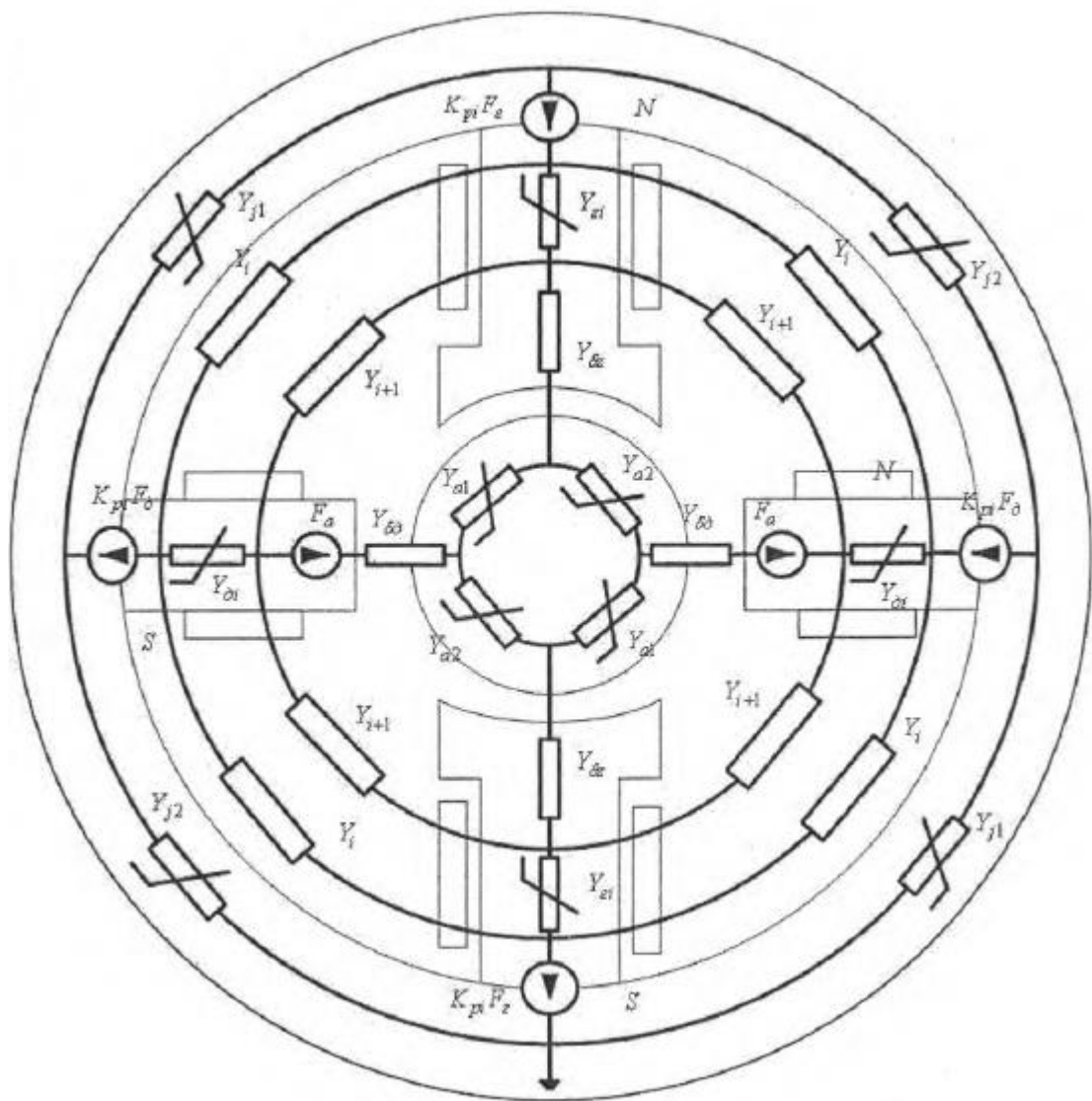


Рисунок 3.1 – Схема заміщення магнітного кола ТЕД

Основними ЕРС, що порушують комутацію в перехідних режимах, є трансформаторна від полів головних полюсів, а також небалансна, що обумовлена неадекватністю зміни комутуючого потоку і струму якоря внаслідок впливу вихрових струмів у магнітному колі додаткових полюсів [8].

Даний метод дозволяє оцінити ступінь розладу комутації шляхом розрахунку. При потребі для поліпшення комутації може бути рекомендоване або розшарування осердя ДП (чого, однак, не завжди достатньо), або застосування пристроїв, що форсують.

3.2 Розрахунок форсуючого пристрою

У роботі для обмеження демпфірування магнітного потоку додаткових полюсів пропонується застосування форсуючого пристрою (обмотки) разом із джерелом реактивного струму – реактором у колі якоря. При цьому таке просте технологічне рішення як розшарування осердь додаткових полюсів повинно бути обов’язково забезпечено.

Розрахунок реалізовано у виді програми, хід рішення задачі й алгоритм такий.

Спочатку визначається необхідний магнітний потік додаткових полюсів стаціонарного режиму.

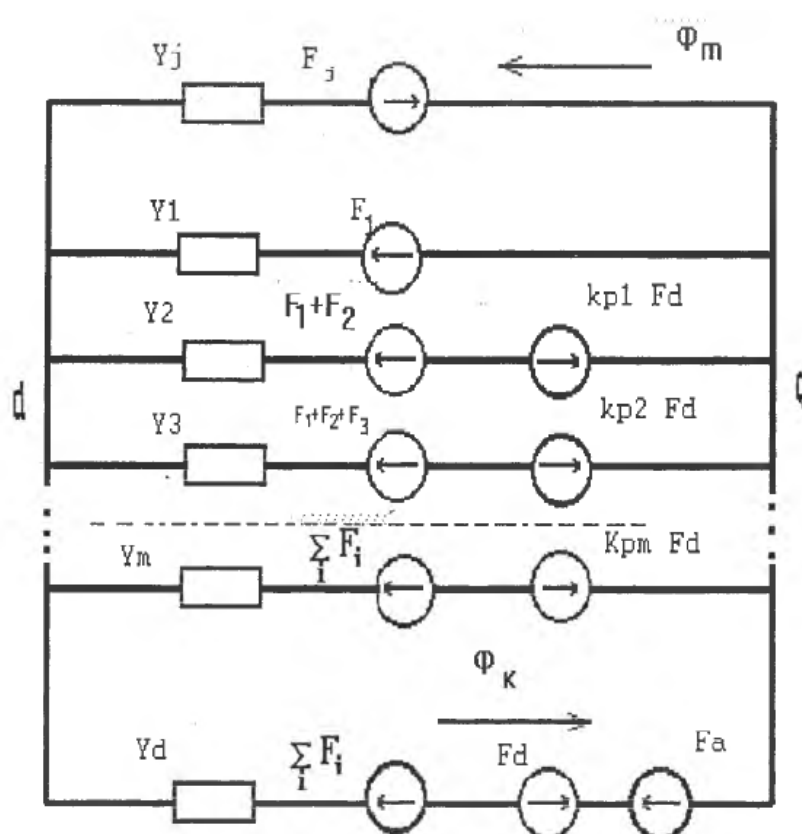


Рисунок 3.2 – Схема заміщення кола ДП з двома вузлами

Виконується розрахунок МРС між вузлами схеми заміщення, а необхідний магнітний потік Φ визначається як:

$$\Phi_{c0} = (F_{\delta} + F_k - F_a - F_{dq})Y_{\delta}, \quad (3.2)$$

Подальший розрахунок ведеться для першої гармоніки змінної складової струму якоря, що складає:

$$I_{1\approx} = K_i \cdot I_{ном}, \quad (3.3)$$

де K_i – коефіцієнт пульсацій струму. Відповідно всі МРС для цієї гармоніки і змінна «ідеальна» складова магнітного потоку ДП у силу лінійності ланцюга ДП теж пропорційно повинні змінитися для своїх амплітудних значень, тобто:

$$\Phi_{\approx} = K_i \cdot \Phi_{c0}, \quad (3.4)$$

3.3 Визначення джерела вихрових струмів у ділянці остову

Визначення комплексної МДС вихрових струмів, її амплітуди і фази, виробляється за методикою, описаною в [4]. Алгоритм у вигляді послідовності формул (3.11) приведений нижче:

$$Y_B = Y_{\delta} + \sum_i Y_i, \quad (3.5)$$

$$Y_m = \frac{Y_B \cdot Y_j}{Y_B + Y_j}, \quad (3.6)$$

$$F_m = \frac{F_{dq} \cdot Y_j}{Y_m} (1 - Y_{ms}^*), \quad (3.7)$$

де Y_j , Y_δ – магнітні провідності проміжків у станини й у якоря під ДП, відповідно, а комплексна магнітна провідність Y_{ms}^* визначається по емпіричній кривій, її амплітуда і фаза у відносних величинах у залежно від частоти пульсацій і постійної часу вихрових струмів ωT_m .

3.4 Визначення магнітного потоку ДП у пульсуючому режимі

Визначення магнітного потоку ДП у пульсуючому режимі здійснюється за схемою заміщення ДП з урахуванням джерел вихрових струмів і наявності форсуючих пристроїв:

$$\Phi_w = (F_\delta + F_k - F_a - F_{dq}^*) \cdot Y_\delta + w_\phi I_\phi \frac{Y_\delta (Y_j + \sum_i Y_i)}{Y_\delta + Y_j + \sum_i Y_i}, \quad (3.8)$$

Параметр F_{dq}^* враховує дію вихрових струмів у магнітопроводі ДП:

$$F_{dq}^* = \frac{\sum_i k_{pi} Y_i (F_\delta + F_k - F_a) Y_\delta + F_m^* \cdot Y_j}{Y_\delta + Y_j + \sum_i Y_i}, \quad (3.9)$$

Значення струму у форсуючій обмотці і зв'язані з нею МРС визначаються зі схеми її вмикання в якірне коло, рисунок 3.3.

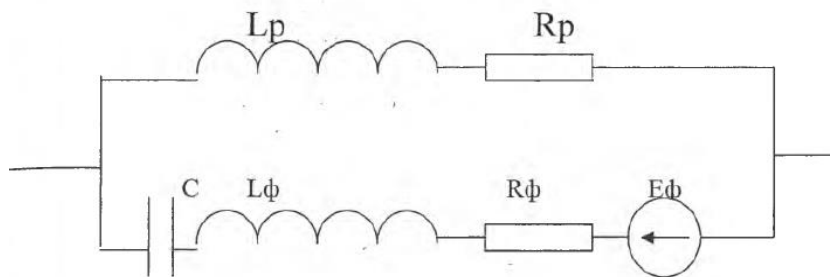


Рисунок 3.3 – Схема вмикання форсуючої обмотки в коло якоря

ЕРС форсуючої обмотки визначається її потокозчепленням:

$$E_{\phi} = j\omega 2pw_{\phi} \cdot \Phi_w, \quad (3.10)$$

У випадку розташування форсуючої обмотки на краях головного полюса, магнітний потік Φ_w повинний включати і складову потоку, що проходить через краї головного полюса. З формул (3.3) і (3.4) виробляється виділення складової ЕДС E_{ϕ} , що залежить тільки від струму I_{ϕ} форсування. Струм форсування визначається з балансу ЕРС у гілках.

$$I_{\phi} = \frac{(r_p + j\omega L_p)I + E_{\phi}}{(r_{\phi} + r_p) + j(\omega L_{\phi} + \omega L_p - \frac{1}{\omega C})}, \quad (3.11)$$

Параметри форсуючої обмотки необхідні для розрахунку струму форсування по формулах (3.9), (3.8).

Активний опір та індуктивність форсуючої обмотки визначається:

$$L_{\phi} = 4pw_{\phi}^2 \lambda_k l_m \cdot 10^{-2}, \quad (3.12)$$

$$r_{\phi} = 1.24 * \frac{4p(l_l + l_m) \cdot 10^{-2} w_{\phi}}{57a_{\phi}^2 q_{\phi}}, \quad (3.13)$$

де λ – питома магнітна провідність розсіювання форсуючої обмотки, l_m , l_l – відповідно довжина полюса і лобової частини обмотки, а q_{ϕ} – перетин дроту форсуючої обмотки.

Результати розрахунку форсування за наведеною програмою засвідчують, що для проектного двигуна число витків форсуючої обмотки може складати 6, з мідного дроту ПСД перерізом 2×3 мм, індуктивність реактора складе 21 мГн, застосування ємності необов'язково.

4 Конструкція модернізованого ТЕД НБ-418К

Тяговий двигун НБ-418К складається з остова, двох підшипникових щитів, шести головних полюсів з компенсаційною обмоткою, шести додаткових полюсів, якоря і щіткового механізму (рисунок 4.1).

Остов служить корпусом тягового двигуна та одночасно його магнітопроводом. Він відливається зі сталі з хорошими магнітними властивостями у вигляді циліндра.

З одного боку на остові відлиті: два кронштейни для кріплення шапок МОН (для опори на вісь колісної пари), чотири кронштейни з отворами для кріплення кожухів зубчастої передачі і два кронштейни з отворами для транспортування ТЕД краном.

З іншого боку до остова ТЕД вісьмома болтами М42 укріплені кронштейни для підвіски ТЕД до рами візка і відлиті вгорі два кронштейни на випадок обриву підвіски ТЕД з отворами для транспортування ТЕД краном [1; 16].

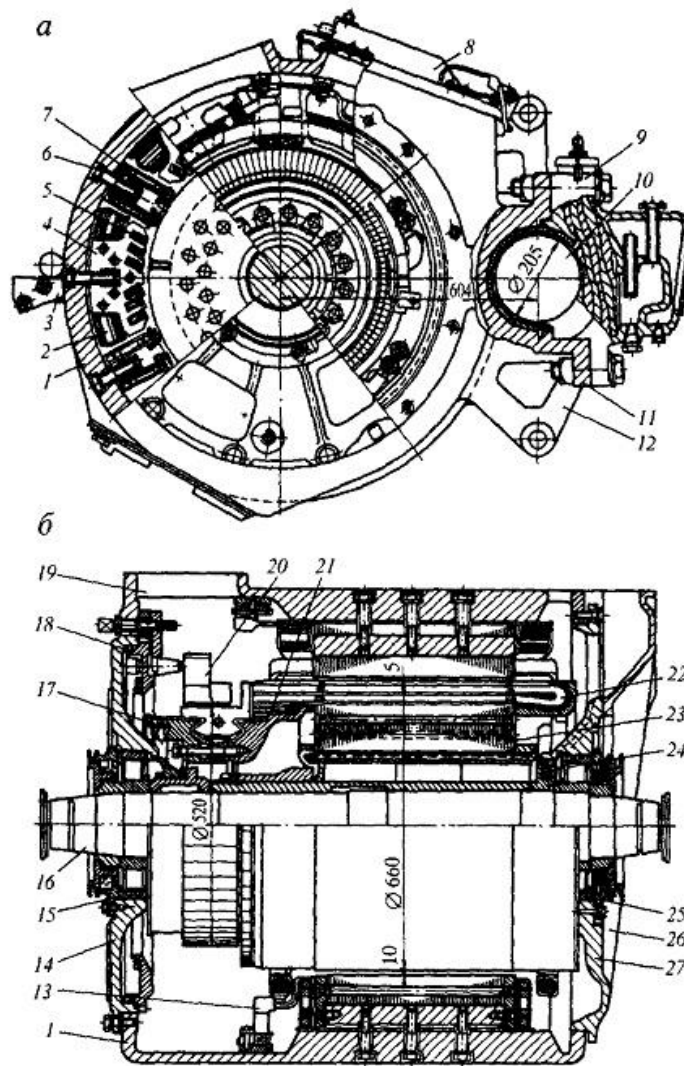
З торців остов має горловину для впресовки підшипникових щитів.

Підшипникові щити служать для кріплення якірних підшипників. Вони відлиті із сталі разом із задніми кришками. Після обточування щити впресовуються в горловину остова і кріпляться 12 болтами збоку до остова. У горловині кожного підшипникового щита встановлений роликовий підшипник.

Головні полюси служать для створення основного магнітного потоку двигуна. Головний полюс складається з осердя й котушки.

Осердя головного полюса набране з окремих листів електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм. Кожен лист має отвори для заклепок і квадратний отвір. Знизу листи мають потовщені полюсні наконечники для утримання котушки і зменшення розсіювання магнітного потоку двигуна.

Знизу в листах осердя виштамповано шість пазів для укладання з двох сторін двох котушок компенсаційної обмотки ТЕД.



1 – остов; 2 – котушка головного полюса; 3, 11, 12 – приливи; 4 – осердя головного полюса; 5 – компенсаційна обмотка; 6 – осердя додаткового полюса; 7 – котушка додаткового полюса; 8 – кришка; 9 – букса моторно-осьового підшипника; 10 – вісь колісної пари; 13 – мідні шини; 14, 27 – підшипникові щити; 15, 25 – роликові підшипники; 16 – вал якоря; 17 – колектор; 18 – траверси; 19 – розтруб для входу охолоджувального повітря; 20 – щіткотримач; 21 – зрівнювачі; 22 – якірна обмотка; 23 – осердя якоря; 24 – ущільнення роликових підшипників; 26 – кожух для виходу охолодженого повітря.

Рисунок 4.1 – Поперечний (а) і повздовжній (б) розрізи
тягового двигуна НБ-418К

При складанні осердя всі листи збираються на заклепках, а з боків ставляться потовщені листи завтовшки 9 мм. Потім усі листи осердя спресовуються (зусиллям 10 тс) і кінці заклепок розклепуються у бічних потовщених листах. Потім у

квадратний отвір осердя впресовується сталевий стрижень перерізом 45×45 мм з трьома отворами з різьбленням М30 для болтів, що кріплять полюс до остова ТЕД [1].

Котушка намотана з шинної міді перерізом 4×65 мм на вузьке ребро і має 11 витків. У крайніх витках шини відігнуті в сторони для виведень.

Міжвиткова ізоляція – азбестовий папір завтовшки 0,3 мм, яка закладається з боків.

Корпусна ізоляція котушки – п'ять шарів мікострічки і один шар склострічки. Усі шари ізоляції намотані напівперекришу. Потім ізоляцію котушки компаундують.

Шість котушок головних полюсів з'єднуються між собою послідовно, шляхом зварювання шин виведень котушок так, щоб утворилися головні полюси різної полярності, так створюється обмотка збудження ТЕД. Від першої і шостої котушок обмотки збудження виводяться кабелі з виведеннями «К» і «КК» назовні ТЕД з протиколлекторного боку для підключення до реверсивного перемикача.

Компенсаційна обмотка складається з шести котушок. Кожна котушка компенсаційної обмотки намотана з мідної шини у вигляді прямокутної спіралі і має шість витків. Кожен виток котушки ізолюється міжвитковою ізоляцією. Потім два витки з ізоляцією складаються разом та ізолюються загальною корпусною ізоляцією. Кожна з шести котушок укладається в три пази осердь двох сусідніх головних полюсів і кріпиться в цих пазах текстолітовими клинами. Котушки з'єднуються між собою послідовно і вмикаються послідовно з обмоткою якоря.

Додаткові полюси служать для поліпшення комутації ТЕД. Додатковий полюс складається з осердя й котушки. Осердя додаткового полюса набране з листів електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм. Кожен лист має отвір для заклепки і прямокутний отвір для стрижня.

При складанні осердя всі листи збираються за допомогою заклепок і на сталевому стрижні перерізом 28×40 мм з трьома різьбовими отворами М20 для болтів, які кріплять полюс до остова ТЕД. Згори до осердя двома гвинтами кріпиться діамагнітна прокладка з текстоліту завтовшки 7 мм для відвертання насичення осердя магнітним потоком.

Котушка намотана з міді перерізом $12,5 \times 12,5$ мм і має 8 витків. У крайніх витків кінці відігнуті вбік для виведень[1].

Міжвиткова ізоляція виконана у вигляді азбестового паперу завтовшки 0,3 мм, яка закладається з боків між витками котушки.

Корпусна ізоляція котушки виконана в п'ять шарів мікастрічкою і один шар склострічкою. Усі шари ізоляції намотані напівперекришу.

На осерді додаткового полюса ближче до якоря розташована форсуюча обмотка, що складається з шести витків дроту ПСД перерізом 2×3 мм.

Шість котушок додаткових полюсів з'єднуються між собою послідовно шляхом зварювання виведень котушок так, щоб утворилися додаткові полюси різної полярності. Шість котушок додаткових полюсів з'єднуються послідовно упереміш з шістьма котушками компенсаційної обмотки, щоб зменшити довжину виведень.

Потім ця обмотка, що складається з шести котушок додаткових полюсів і шести котушок компенсаційної обмотки, вмикається послідовно з обмоткою якоря з боку виведення «ЯЯ».

Проміжок між головними полюсами і якорем складає 5 мм; проміжок між додатковим полюсом і якорем складає 10 мм, довжина осердь якоря головних і додаткових полюсів складає 400 мм.

Якір служить для створення обертального моменту ТЕД. Він складається з вала, втулки, задньої натискної шайби, шихтованого осердя, колектора й обмотки.

Вал якоря виготовлено із хромонікелевої сталі, на кінцях вал якоря має конічну частину з ухилом 1: 10 для напресовки шестерні зубчастої передачі.

Втулка якоря відлита зі сталі у вигляді двох циліндрів, з'єднаних ребрами. Втулка якоря виконана коробчастої форми, оброблена по внутрішньому і зовнішньому діаметрам – для напресовки на вал і посадки на неї осердя і двох натискаючих шайб. Передня шайба об'єднана з втулкою колектора. Задня натискаюча шайба (і корпус колектора) служать для утримання листів осердь якоря в спресованому стані і для кріплення на них бандажами лобових частин обмотки якоря.

Шихтоване осердя якоря набране з окремих листів електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм. Кожен лист зовні має 87 пазів для укладання котушок обмотки якоря і два ряди вентиляційних отворів для охолодження осердя (44 отвори 0,30 мм).

При складанні всі листи осердя окремими пакетами зі шпонкою напресовуються на втулку якоря. При цьому з боків осердя встановлюються потовщені листи (10 листів завтовшки 1 мм) з меншою висотою зубців, щоб запобігти відгинанню зубців на крайніх листах. Довжина осердя якоря складає 400 мм.

Колектор складається з 348 колекторних пластин, 348 міканітових прокладок, трьох ізоляційних міканітових циліндрів, корпусу (у вигляді двох втулок, з'єднаних ребрами), натискаючого конуса у вигляді кільця і стяжних болтів.

Колекторна пластина має форму клину, вона виконана з міді з добавкою срібла 0,1%. Згори пластина має робочу частину для щіток і півник з прорізом для запаювання кінців секцій обмотки якоря. Знизу пластина має форму «ластівчиного хвоста» для кріплення та отвір для полегшення. Міканітова прокладка має таку ж форму.

В середину кільця з пластин ставиться ізоляційний міканітовий циліндр, з боків у «ластівчин хвіст» ставляться два фігурні міканітові циліндри для ізоляції колекторних пластин з трьох сторін[7].

Потім з боків у «ластівчин хвіст» з міканітовими циліндрами вставляються сталевий корпус колектора і нажимний конус у вигляді кільця, які спресовуються один до одного і стягуються між собою колекторними болтами.

Зібраний колектор корпусом напресовується на кінець втулки якоря і закріплюється на втулці гайкою у вигляді кільця. Ця гайка стопориться зваркою.

Обмотка якоря – петльова, складається з 87 котушок і 58 котушок вирівнювачів. Кожна з 87 котушок обмотки якоря складається з чотирьох секцій, розташованих плазом в пазах осердя якоря. Кожна секція обмотки якоря виконана з шинної міді перерізом $3,53 \times 6,9$ мм у формі петлі.

Кожна секція ізолюється одним шаром мікастрічки. Потім чотири секції з міжвитковою ізоляцією ізолюються загальною корпусною ізоляцією на 950 В

(чотири шари мікастрічки напівперекришу і один шар склострічки), у результаті утворюється котушка обмотки якоря.

Вирівнювач виконано з мідної шинки перерізом $1,68 \times 4,7$ мм та ізолювано одним шаром мікастрічки напівперекришу.

Щітковий механізм служить для підведення напруги до обмотки якоря, через колектор. Він складається з поворотної траверси, ізолюваних пальців (12 шт.), кронштейнів щіткотримачів (6 шт.), щіткотримачів (6 шт.), щіток (18 шт.).

Траверса з усім щітковим механізмом жорстко стопориться в остові ТЕД на геометричній нейтралі спеціальним фіксатором. Дванадцять пальців попарно циліндричною частиною щільно вставляються збоку в отвори траверси і кріпляться до траверси спеціальними гайками.

Кронштейн (6 шт.) складається з верхньої і нижньої сталевих частин, встановлених на двох ізолюваних пресмасою пальцях і скріплених між собою одним болтом згори. Нижня частина кронштейна має спереду гребінку з приварною шпилькою і гайкою для кріплення щіткотримача.

Щіткотримач складається з корпусу і трьох натискних пристроїв. Корпус щіткотримача відлито з латуні, має згори три вікна для трьох щіток, спереду має гребінку з овальним отвором для кріплення до гребеня кронштейна.

Щітки (18 шт. по 3 шт. у кожному щіткотримачі) марки ЕГ-61 – електрографітові, розрізні, з армованими гнучкими мідними шунтами; розміри щітки: $12,5 \times 32 \times 57$ мм.

5 Ремонт компенсаційної обмотки

При підготовці до ремонту тягових двигунів необхідно зняти їх з електровоза та очистити від бруду. Після миття та очищення тягові двигуни направляють для ремонту в електромашинний цех. Перевіряють технічний стан тягового двигуна: вимірюють опір його ізоляції, активний опір його обмоток, прослуховують якірні підшипники та візуально оглядають стан підшипникових вузлів зовні, вимірюють аксиальний розбіг якоря та радіальні проміжки підшипників, перевіряють стан колектору [1; 3; 16].

Якір, полюсні котушки або котушка компенсаційної обмотки з «пробоєм» їх ізоляції підлягають заміні. Активний опір обмоток тягового двигуна перевіряють прибором Р3009 по схемі подвійного моста.

У магнітну систему остова двигуна входить: головні та додаткові полюси, компенсаційні обмотки, ізоляція між котушками. Перераховані вузли магнітних систем тягових двигунів електровозів змінного струму по конструктивному виконанні дуже схожі, що зумовлює загальний технологічний підхід до їх ремонту як в умовах депо, так і в умовах ремонтних заводів.

Найбільша кількість пошкоджень на тяговому двигуні з опорно-осьовим підвішуванням, як правило, відбувається на компенсаційних обмотках, оскільки саме вони схильні до найбільших динамічних пошкоджень, що виникають від ударів колісних пар при проходженні рельсових стиків та інших нерівностей шляху [1].

Основною ознакою ослаблення компенсаційних обмоток є наявність слідів їх переміщення, які можна визначити по зміщенню пружинних фланців, ослабленню немагнітних кутників і полюсних болтів, наявності тріщин у заливки головок полюсних болтів, потертості ізоляції.

Оглядають компенсаційні обмотки, перевіряють щільність їх установки в пазах осердь полюсів, стан лобових частин. Найбільш характерними пошкодженнями компенсаційних обмоток є: перетирання їх ізоляції на виході

катушок у пазах, послаблення клинів, пошкодження виводів, підгари з'єднань виводів компенсаційних катушок один об інший або з выводами додаткових полюсів. На лобових частинах обмоток спостерігаються механічні пошкодження ізоляції частинками пилю, що були занесені у двигун з охолоджуючим повітрям.

Послаблення компенсаційних обмоток у пазах усувають так само, як і послаблення полюсних катушок, – установкою прокладок із просоченого електрокарбону (таке ущільнення може виконуватися, якщо немає стирання покривної ізоляції катушки), установленням нових клинів. Незначні поверхневі пошкодження ізоляції компенсаційних обмоток у лобових частинах усувають шляхом очищення цих місць пошкодженої ізоляції, покриттям їх ізоляційним лаком і ізолюванням склострічкою з помазанням її цим же лаком. Компенсаційну катушку з пробоем ізоляції, зломом виводу демонтують та замінюють на справну.

Компенсаційна обмотка тягового двигуна складається з шести катушок. Кожну катушку укладають у пази осердь двох, розташованих поруч головних полюсів; її центральний вивід під'єднаний до виводу катушки додаткового полюса, а боковий вивід – до сусідньої катушки компенсаційної обмотки.

При заміні компенсаційної катушки необхідно розізолювати з'єднання та від'єднати обидва її виводи, вибити клини із пазів обох осердь, в яких розташовані витки катушки. Катушку потрібно виймати із пазів поступово легким розкачуванням (від руки), оскільки при необережних діях можна пошкодити ізоляцію катушки, а також порушити її конфігурацію. Катушку з такими пошкодженнями не можна буде відремонтувати в депо. Після визволення пазів осердя від катушки пази оглядають та очищають від старої ізоляції. Після очищення в пазах не повинно залишатися гострих кромek, ґратів та інших дефектів, які можуть викликати пошкодження ізоляції катушки, що знову встановили.

Після установки нової (або відремонтованої) компенсаційної катушки її нагрівають, а пази промазують лаком ФЛ-98 або ПЕ-933; на дно пазів укладають прокладки зі склолакотканини, потім U-подібну вистилку паза, що виготовляється із склопласта або ізофлекса товщиною 0,15-0,20 мм, та U-подібну кутову ізоляцію по обидва кінці пазів. Після цього катушку виставляють по всіх пазах обох полюсів. Осердя суміжних полюсів повинні бути встановлені так, щоб їх пази були

паралельними прямолінійній частині витків котушки та щоб при укладанні витків у пази не потрібно було б їх натягувати або стискати, вони повинні входити в паз вільно.

Виставлену по пазах компенсаційну котушку легким постукуванням по її витках по всій довжині осаджають до дна пазів. При осадці застосовують молоток з текстолітовою підбійкою.

Після встановлення котушки в деяких пазах можуть бути нещільності між стінкою паза та витком котушки. У цих випадках між витком котушки та стінкою паза прокладають смужки ізофлекса або просоченого електрокартону. Так само проводять й ущільнення котушки по висоті паза. Упевнившись, що котушка встановлена правильно, забивають клини для кріплення.

Монтаж компенсаційних обмоток в остові необхідно виконувати обережно, виключив можливість їх ударів, оскільки це може спричинити пошкодження ізоляції. Після встановлення компенсаційних котушок у задній лобовій частині зі сторони, протилежній колектору, перевіряють відстань від осердя до внутрішнього витка котушки, яка повинна бути 25 ± 5 мм.

У сучасних конструкціях магнітних систем є різноманітні виводи компенсаційних котушок, але принциповою різницею у виконанні є застосування гнучкого або жорсткого виводів. До жорстких виводів відносять ті, які виготовлені зі шинної або листової міді, до гнучких – із ізольованого проводу або мідного плетіння.

Часто причиною пошкодження тягових двигунів в експлуатації є зломи виводів компенсаційних котушок. Ці пошкодження найчастіше виникають у магнітних системах, у яких застосовують жорсткі виводи із котушок.

Виводи компенсаційних обмоток також мають різноманітні виконання. На тягових двигунах НБ-418К виводи компенсаційних котушок виготовляють із мідного плетіння ПЩ. Проте в експлуатації ще використовують двигуни, у яких бокові виводи компенсаційних обмоток виготовлені жорсткими, оскільки така конструкція застосовувалася на тягових двигунах ранніх випусків.

На тягових двигунах з опорно-осьовою підвіскою конструкція жорстких виводів компенсаційних обмоток не виправдала себе. Ці виводи мали в експлуатації

підвищену пошкодженість через їх злами, саме тому сьогодні для підвищення надійності раніше випущених тягових двигунів із жорсткими виводами компенсаційних обмоток при середньому та капітальному ремонті жорсткі виводи замінюють на гнучкі. Для виготовлення гнучких виводів у двигунах НБ-418К приймають мідне плетіння ПЩ і дріт ППСТ. Виводи із компенсаційних обмоток виготовляють із плетіння ПЩ.

При капітальному ремонті тягових двигунів в обмотках магнітних систем застосовують як корпусну ізоляцію склослюдинітову стрічку ЛС-1-К-110, як виткову ізоляцію – стрічку ЛС1-К-110 або ЛС-ЕК-5 (у компенсаційних обмотках).

Попередньо котушки компенсаційних обмоток, що підлягають ремонту, дуже ретельно оглядають і перевіряють по всьому периметру. Корпусну ізоляцію в місцях пошкодження відновлюють склослюдинітовою стрічкою ЛС1-К-110 або ЛС-ЕК-5.

Склострічку використовують як покривну ізоляцію. Після накладення покривної ізоляції компенсаційну котушку пропитують 2 рази лаком ФЛ-98. Перед просоченням котушки нагрівають до температури 70-80°C. Після просочення компенсаційні котушки сушать при температурі 130°C протягом 8 годин після першого просочення та протягом 15 годин після другого просочення.

Котушки компенсаційних обмоток, корпусна ізоляція яких виконана із мікаленти або склослюдинітової стрічки, мають затертості, підгари або інші пошкодження ізоляції, демонтують з остова і ремонтують із заміною покривної та відновленням корпусної ізоляції [3].

6 Опис силової схеми

У силові кола однієї секції електровоза (рисунок 6.1) входить наступне обладнання: трансформатор 3, що знижує напругу контактної мережі; кремнієві випрямні установки 61 і 62, що перетворюють змінну напругу вторинної обмотки трансформатора в постійну, необхідну для живлення тягових двигунів; тягові двигуни I - IV; апаратура, що забезпечує регулювання швидкості електровоза, зміна напрямку руху і захист тягових двигунів в аварійних режимах[16].

Тягові двигуни з'єднані паралельно і кожен два двигуни живляться від окремої випрямної установки через груповий згладжувальний реактор.

У ланцюзі первинної обмотки тягового трансформатора включений фільтр 10, призначений для додаткового вузькосмугового захисту поїзного радіозв'язку від перешкод, створюваних електроустаткуванням електровоза. Фільтр складається з дроселя і двох конденсаторів, що включаються паралельно дроселю. Змінною ємністю фільтр налаштовується на резонанс струмів при частоті 2,13 мГц, на якій працює поїзний радіозв'язок. Цим самим замикаються частотні перешкоди, що йдуть з електровоза в контактну мережу[1].

Для забезпечення електричного гальмування на електровозі встановлено обладнання : гальмівні перемикачі 49, 50, які виконують перемикання силових кіл з тягового режиму в гальмівний і назад; блокувальний перемикач БП, що виробляє переключення ланцюгів управління з тягового режиму в гальмівний і назад; гальмівні резистори R11 - R14, що включаються в гальмівному режимі паралельно якоря кожного двигуна; випрямна установка збудження 60 (ВУЗ), призначена для живлення обмоток збудження тягових двигунів в гальмівному режимі; блок управління реостатним гальмуванням БУРГ, призначений для автоматичного управління режимом електричного реостатного гальмування; панель захисту від «юзу» - 15, призначена для захисту від «юзу» колісних пар[16].

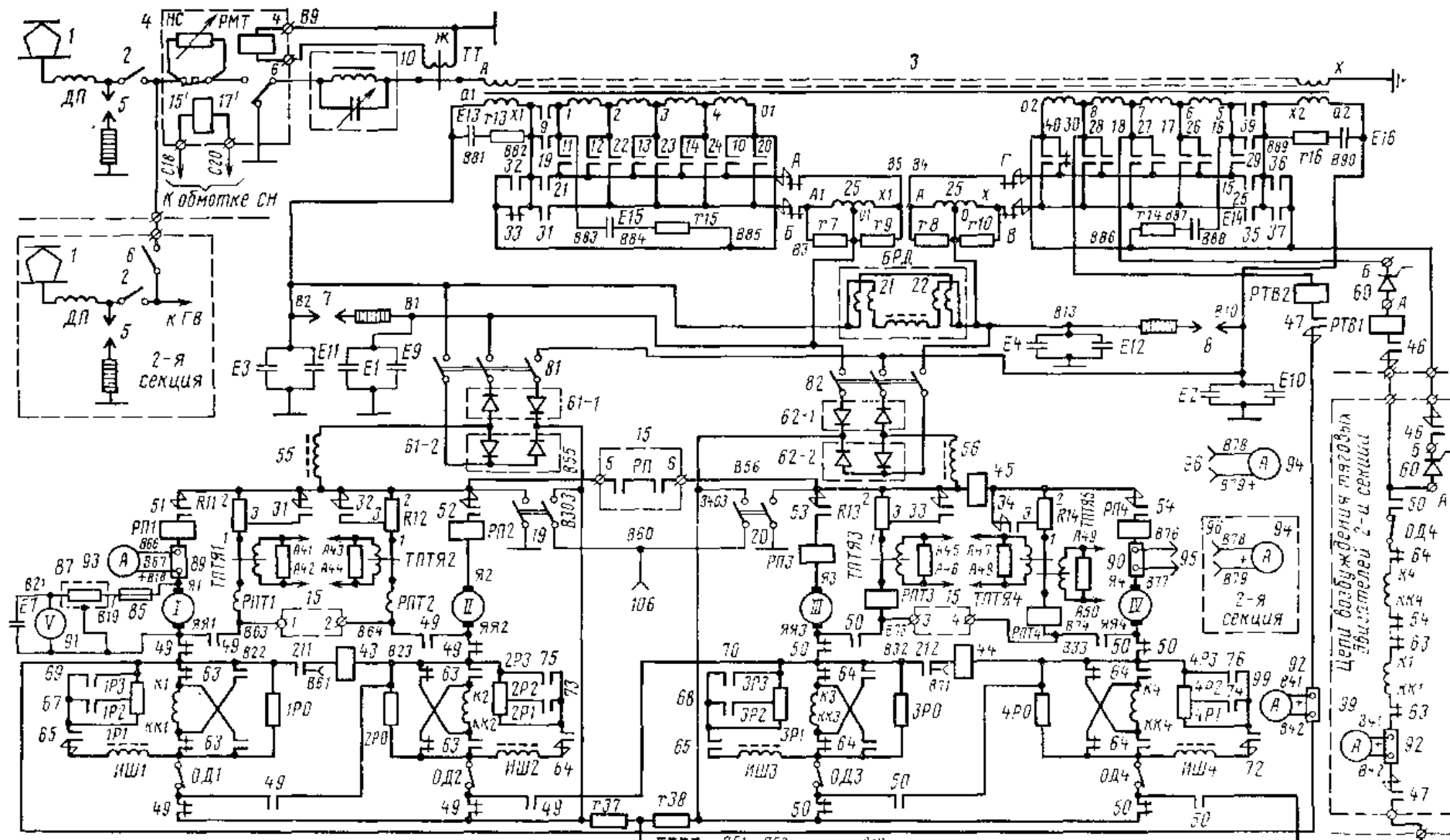


Рисунок 6.1 – Силові кола електровоза

Первинна обмотка трансформатора 3 з'єднується з контактною мережею струмоприймачем 1 і головним вимикачем 4. Силові контакти з дугогасіння головного вимикача шунтовані нелінійним резистором НС для зменшення перенапруг, що виникають при їх розмиканні. Знижена напруга вторинної обмотки випрямляється по двохнапівперіодній мостовій схемі.

Два плеча моста установки 61 розімкнуті і підключені таким чином: одне до напівобмотки трансформатора $a1 - o1$ (вивід $o1$), інше - до напівобмотки $o2 - a2$ (вивід $a2$). Аналогічно включена і випрямна установка 62; розімкнуті плечі підключені: одне до висновку $o1$, друге - до висновку $a2$. Знижена та випрямлена напруга підводиться до тягових двигунів.

При напрямку струму в обмотці $a1 - x1$ від виведення $a1$ до $x1$, а в обмотці $x2 - a2$ від виведення $x2$ до $a2$ тягові двигуни отримують живлення по колу: висновок трансформатора $o1$, плече випрямної установки 62, двигуни III, IV, згладжувальний реактор 56, плече випрямної установки 62, вивід трансформатора $o2$, обмотка трансформатора $a2 - x2$, виводи 5, $a2$, плече випрямної установки 61, двигуни I, II, реактор 55, плече випрямної установки 61, вивід трансформатора $a1$. Таким чином, кожна обмотка силового трансформатора і кожна група тягових двигунів включаються послідовно. При напрямку струму в обмотці $a1 - x1$ від виводу $x1$ до $a1$, а в обмотці $a2 - x2$ від виводу $a2$ до $x2$ тягові двигуни I і II отримують живлення від напівобмотки $o1 - a1$, а тягові двигуни III і IV – від напівобмотки $o2 - a2$ [16].

Зміна напруги в одному колі трансформатора при такій схемі включення призводить до зміни випрямленої напруги на виводах обох мостів. Для зниження пульсацій в ланцюзі випрямленого струму встановлені згладжувальні реактори 55, 56.

7 Техніко-економічне обґрунтування проведення модернізації тягового електродвигуна електровоза ВЛ80

7.1 Економічна ефективність застосування модернізованого ТЕД в експлуатації

У роботі пропонується модернізація тягового двигуна електровоза ВЛ80 шляхом оснащення його форсуючим пристроєм, що значно поліпшить комутацію тягового двигуна. Завдяки цій мірі зменшується зношення електрощіток, тобто знижуються поточні витрати на їх заміну, а також зменшуються витрати на ремонт ТЕД за рахунок підвищення надійності його роботи в експлуатації. На електровозі ВЛ80 встановлено вісім тягових двигунів. У зв'язку з цим для отримання оцінки результатів проводимо економічний розрахунок впровадження запропонованого заходу [11; 12].

Вихідні дані для розрахунку економічного ефекту наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані для розрахунку економічного ефекту

№ п/п	Найменування показника	Величина показника
1	2	3
1	Середній строк служби електрощітки $t_{\text{ещ}}^{\delta}$, міс	7
2	Середній строк служби електрощітки при використанні модернізованого ТЕД, $t_{\text{ещ}}^{\text{н}}$, міс	12
3	Трудоемність зміни однієї електрощітки, $V_{\text{п}}$ чол. год.	0,9
4	Годинна тарифна ставка слюсаря при відрядній оплаті праці, $C_{\text{т}}$, грн.	74,43
5	Коефіцієнт, що враховують: додаткову заробітну плату, $K_{\text{дод}}$	1,1
	нарахування на заробітну плату, $K_{\text{нар}}$	1,22
	премії, $K_{\text{пр}}$	1,25
6	Ціна однієї електрощітки, $C_{\text{ещ}}$, грн.	3250
7	Кількість електрощіток на ТЕД, $n_{\text{ещ}}$, штук	12
8	Кількість ТЕД на електровозі, $n_{\text{ТЕД}}$, штук	8

Продовження таблиці 7.1

1	2	3
9	Міжремонтний пробіг, тис. км	
	КР-2	2600
	КР-1	960
	ПР-3	480
10	Очікуване збільшення міжремонтного пробігу, $\Pi_L\%$	20
11	Собівартість одиниці ремонту ТЕД в об'ємі ремонту, грн.	
	КР-2	418690
	КР-1	315780
	ПР-3	156325
12	Нормативний строк служби електровоза t_n рік	40
13	Фактичний строк служби електровоза t_f років	30
14	Середньодобовий пробіг електровоза, $S_{\text{л}}$, км	415
15	Кількість відмов ТЕД з причини кругового вогню по колектору на млн. км пробігу	4,06
16	Частка витрат на ремонт колектору % від загальних витрат на одиницю ремонту ТЕД	60
17	Експлуатаційний парк електровозів, $M_{\text{ел}}$	10

До капітальних вкладень на модернізацію одного ТЕД електровоза ВЛ80 входять витрати на придбання набору додаткових обмоток на 1 ТЕД вартістю 125500 грн., який виготовлено «Смілянським електромеханічним заводом».

На основі цих даних розраховуємо витрати на придбання набору додаткових обмоток на електровоз:

$$B_{\text{кот}} = B_1 \times n_d, \quad (7.1)$$

де B_1 – ціна одного набору обмотки, грн;

n_d – кількість ТЕД на 1 електровоз.

Підставляємо дані у формулу і розраховуємо:

$$B_{\text{кот}} = 125500 \times 8 = 1004000 \text{ грн.}$$

7.2 Витрати підприємства на оплату праці працівників

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та відрахування на соціальні заходи, що пов'язані з демонтажем базового ТЕД електровоза.

Трудові витрати на демонтаж базового ТЕД представлені в таблиці 7.2, а монтаж нового модернізованого ТЕД представлені в таблиці 7.3, де розрахована основна і додаткова заробітна плата слюсарів четвертого і п'ятого розрядів за видами виконаних робіт, а також загальна сума трудових витрат.

Витрати на монтаж та демонтаж складають:

$$\begin{cases} B_{\text{МОНТ}} = Z_{\text{м}} \cdot m \\ B_{\text{ДЕМОНТ}} = Z_{\text{д}} \cdot m' \end{cases} \quad (7.2)$$

де m – кількість ТЕД на одному електровозі;

$Z_{\text{д}}$ – витрати на демонтаж обладнання, грн;

$Z_{\text{м}}$ – витрати на монтаж обладнання, грн.

Таблиця 7.2 – Витрати на заробітну плату та відрахування для демонтажу базового ТЕД

Вид робіт	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соц. заходи, грн. (22,0%)	Усього, грн.
Демонтаж ТЕД	4	40	64,99	2599,6	259,96	629,1	3488,66
Демонтаж ТЕД	5	40	74,43	2977,2	297,72	720,48	3995,4
Разом				5576,80	557,68	1349,59	7484,07

Таблиця 7.3 – Витрати на заробітну плату та відрахування для монтажу модернізованого ТЕД

Вид робіт	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соц. заходи, грн. (22,0%)	Усього, грн.
Монтаж форсуючого пристрою ТЕД	4	40	64,99	2599,6	259,96	629,1	3488,66
Монтаж форсуючого пристрою ТЕД	5	40	74,43	2977,2	297,72	720,48	3995,4
Разом				5576,80	557,68	1349,59	7484,06

Підставляємо значення та отримуємо:

$$B_{\text{ДЕМОНТ. ТЕД}} = 7484,06 \times 8 = 59872,48 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{МОНТ. ТЕД}} = 7484,06 \times 8 = 59872,48 \text{ грн.}$$

7.3 Капітальні витрати на модернізацію одного ТЕД

Капітальні витрати на модернізацію ТЕД електровоза складають, грн.:

$$\Delta B = B_{\text{КОТ}} + \Sigma B_{\text{МОНТ}} + \Sigma B_{\text{ДЕМОНТ}}, \quad (7.3)$$

де $B_{\text{КОТ}}$ – витрати на придбання та впровадження нового обладнання на електровозі

$\Sigma B_{\text{МОНТ}}$ – монтаж обладнання, грн.;

$\Sigma B_{\text{ДЕМОНТ}}$ – витрати на демонтаж обладнання, грн.

$$\Delta K = 1004000 + 59872,48 + 59872,48 = 1123744,8 \text{ грн.}$$

Капітальні витрати на модернізацію 10 електровозів складають, грн:

$$\sum \Delta K = \Delta K \cdot 10, \quad (7.4)$$

$$\sum \Delta K = 1123744,8 \times 10 = 11237448 \text{ грн.}$$

Обладнання електровоза модернізованим ТЕД не впливає на вартісну оцінку результатів, тому економічний ефект визначається зниженням витрат депо за період роботи електровоза до його виключення з експлуатаційного парку відповідно до встановлених норм.

Економічний ефект (грн.) визначаємо за формулою [8]:

$$E_T = \sum_{tn}^{tk} (\Delta U_t + \Delta K_t - \lambda_t) \alpha_t, \quad (7.5)$$

де ΔU_t – зниження поточних витрат в році t розрахункового періоду, грн.;

ΔK_t – додаткові капітальні вкладення в році t розрахункового періоду, грн.;

λ_t – вартість ліквідації основних фондів, вибуваючи в році t розрахункового періоду, грн.;

α_t – коефіцієнт приведення різночасних та витрат до одного розрахункового року.

Коефіцієнт α_t визначається за формулою:

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_r - t}, \quad (7.6)$$

де E_n – норматив приведення різночасних результатів та витрат, $E_n = 0,1$;

t_r – розрахунковий рік;

t – рік, результати та витрати якого приводяться до розрахункового.

За розрахунковий рік t_r приймаємо рік, попередній початку експлуатації модернізованих електровозів, у даному випадку 2024 рік; за початковий рік t_n – рік початку експлуатації модернізованих електровозів, у даному випадку це 2025 рік; кінцевий рік t_k – розрахункового періоду визначається моментом завершення експлуатації модернізованих електровозів.

Планомірний план постановки електровозів на ремонт ПР-3, де буде виконуватись модернізація, на розрахунковий період не розробляється, тому неможливо точно розрахувати економічний ефект на середній залишковий строк служби парку електровозів у депо.

Середній залишковий строк служби електровозів визначаємо з формули:

$$t_{\text{зал}} = t_n - t_{\text{ф}}, \quad (7.7)$$

$$t_{\text{зал}} = 40 - 30 = 10 \text{ років.}$$

За цих умов кінцевим роком розрахункового періоду буде 2034 рік.

7.4 Скорочення поточних витрат на електроцітки

Зменшення річної потреби в електроцітках у розрахунку на один електровоз знаходимо за формулою:

$$\Delta n_{\text{ещ}} = \left(\frac{1}{t_{\text{ещ}}^{\delta}} - \frac{1}{t_{\text{ещ}}^{\text{н}}} \right) \cdot 12 \cdot n_{\text{ещ}} \cdot n_{\text{ТЕД}}, \quad (7.8)$$

де $n_{\text{ещ}}$ – кількість електроціток на 1 ТЕД;

$n_{\text{ТЕД}}$ – кількість ТЕД на електровозі.

$t_{\text{ещ}}^{\delta}, t_{\text{ещ}}^{\text{н}}$ – термін служби електрощітки відповідно, для базового та модернізованого ТЕД.

$$\Delta n_{\text{ещ}} = \left(\frac{1}{7} - \frac{1}{12} \right) \cdot 12 \cdot 12 \cdot 8 = 68,57.$$

Питомі витрати на заміну однієї електрощітки визначаються за формулою:

$$U_n^{\text{ЗМ}} = C_{\text{т}} \cdot B_n \cdot K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{нар}} \cdot K_{\text{дод}}, \quad (7.9)$$

де $C_{\text{т}}$ – годинна тарифна ставка слюсаря з ремонту рухомого складу 5-го розряду, грн.;

B_n – трудомісткість заміни щітки, н-год.;

$K_{\text{пр}}, K_{\text{нар}}, K_{\text{дод}}$ – коефіцієнт, що враховує відповідно, виплату премії, відрахування на соціальні заходи, додаткову заробітну плату.

Питомі витрати на заміну однієї електрощітки складуть

$$U_n^{\text{ЗМ}} = 74,43 \cdot 0,9 \cdot 1,25 \cdot 1,22 \cdot 1,1 = 112,37 \text{ грн.}$$

Таким чином. економія поточних витрат у зв'язку зі зменшенням витрат електрощіток у розрахунку на один електровоз за рік визначаємо за формулою:

$$\Delta U_{\text{ещ}} = \Delta n_{\text{ещ}} (U_n^{\text{ЗМ}} + \text{Ц}_{\text{ещ}}), \quad (7.10)$$

$$\Delta U_{\text{ещ}} = 68,57 \cdot (112,37 + 3250) = 230557,7 \text{ грн.}$$

де $\text{Ц}_{\text{ещ}}$ – ціна за одиницю електрощітки, грн.

Застосування модернізованих ТЕД на електровозі підвищує надійність його роботи, тобто дозволяє збільшити міжремонтний період ремонту ТЕД, що дає можливість зменшити кількість ремонтів за ремонтний цикл. Однак

при цьому, у зв'язку зі зміною конструктивних елементів ТЕД, збільшується трудомісткість ремонтних робіт, що призводить до деякого збільшення собівартості одиниці ремонту ТЕД.

З огляду на періодичність окремих видів ремонту та збільшення міжремонтного періоду внаслідок застосування модернізованого ТЕД, розраховуємо кількість його ремонтів за ремонтний цикл, результати розрахунків наводимо в таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – Кількість періодичних ремонтів ТЕД за ремонтний цикл у розрахунку на один електровоз

№ п/п	Показник	Значення по варіантам	
		базовий	новий
1	Пробіг електровоза між видами ремонту, тис. км.		
	КР-2	2600	2600
	КР-1	960	1152
	ПР-3	480	576
2	Середньодобовий пробіг електровоза, км	415	415
3	Річний пробіг електровоза, тис. км	127,75	127,75
4	Кількість ремонтів ТЕД електровоза за ремонтним циклом	1	1
	$N_{\text{КР-2}}$		
	$N_{\text{КР-1}}$	2,7	2,3
	$N_{\text{ПР-3}}$	5,4	4,5
5	Періодичність ремонту ТЕД, років		
	$t_{\text{КР-2}}$	17,2	17,2
	$t_{\text{КР-1}}$	6,3	7,6
	$t_{\text{ПР-3}}$	3,2	3,8

У подальших розрахунках прийнято, що скорочення кількості ремонтів по варіанту модернізації ТЕД не буде впливати на прибутки депо, оскільки вивільнена потужність та контингент робітників будуть використані для інших потреб. У зв'язку з цим у даному випадку економічне обґрунтування ефективності застосування модернізованого ТЕД зводиться до мінімуму витрат.

Зменшення витрат на ремонт ТЕД розраховуємо в таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Визначення поточних витрат на ремонт одиниці ТЕД за один ремонтний цикл

Показник	Значення по варіантах	
	базовий	новий
Кількість ремонтів за ремонтний цикл:		
- N _{КР-2}	1	1
- N _{КР-1}	2,7	2,3
- N _{ПР-3}	5,4	4,5
Збільшення витрат на одиницю ремонту модернізованого ТЕД, %	–	5
Витрати на ремонт одиниці ТЕД, грн., усього:		
- C _{КР-2}	418690	439624,5
- C _{КР-1}	315780	331569
- C _{ПР-3}	156325	164141,3
Кількість відмов ТЕД з причини колового вогню по колектору на млн. км пробігу	4,06	–
Частка витрат на ремонт колектора, % від загальних витрат на ремонт ТЕД	60	60
Пробіг електровоза за ремонтний цикл, тис. км	2600	2600
Поточні витрати на ремонт ТЕД за ремонтний цикл, грн.	2120687,9	1928872,7
Поточні витрати на усунення відмови ТЕД з причини колового вогню за ремонтний цикл, грн.	990100,0	
Усього: поточні витрати за ремонтний цикл, грн.	3110787,9	1928872,7

Економія поточних витрат на ремонт ТЕД у розрахунку на один електровоз (грн.) за рік визначаємо за формулою:

$$\Delta U_{\text{ПВ}} = \frac{8 \times (U_{\text{ПВ}}^{\text{б}} - U_{\text{ПВ}}^{\text{н}})}{t_{\text{кр}-2}}, \quad (7.11)$$

де $U_{\text{ПВ}}^{\text{б}}$ – поточні витрати базового варіанту електровоза, грн;

$U_{\text{ПВ}}^{\text{н}}$ – поточні витрати нового варіанту електровоза, грн;

$t_{\text{кр}-2}$ – періодичність КР-2, років;

8 – кількість ТЕД на електровозі.

$$\Delta U_{\text{ПВ}} = \frac{8 \times (3110787,9 - 1928872,7)}{17,2} = 550863,4 \text{ грн.}$$

Економія поточних витрат у розрахунку на один електровоз у рік визначаємо з формули:

$$\Delta U = \Delta U_{\text{ещ}} + \Delta U_{\text{ПВ}}, \quad (7.12)$$

$$\Delta U = 230557,7 + 550863,4 = 781421,1 \text{ грн.}$$

Модернізацію електровозів планується виконувати при проведенні ПР–3. На основі цього визначаємо річну програму модернізації електровозів за формулою:

$$M_{\text{ПР-3}} = \frac{\sum MS_{\text{заг}}}{L_{\text{ПР-3}}} - \frac{\sum MS_{\text{заг}}}{L_{\text{КР-1}}} - \frac{\sum MS_{\text{заг}}}{L_{\text{КР-2}}}, \quad (7.13)$$

де $\sum MS_{\text{заг}}$ – загальний пробіг електровозів за рік, лок-км;

$L_{\text{ПР-3}}, L_{\text{КР-1}}, L_{\text{КР-2}}$ – міжремонтні пробіги відповідно ПР–3, КР–1, КР–2, тис. км.

Загальний пробіг експлуатаційного парку електровозів (10 од.) за рік визначаємо за формулою:

$$\sum MS_{\text{заг}} = M_{\text{ел}} \cdot S_{\text{л}} \cdot 365, \quad (7.14)$$

$$\sum MS_{\text{заг}} = 10 \cdot 415 \cdot 365 = 1514750 \text{ (локомотиво – кілометрів).}$$

$$M_{\text{ПР-3}} = \frac{1514750}{1000} \left(\frac{1}{480} - \frac{1}{960} - \frac{1}{2600} \right) = 0,995.$$

Приймаємо $M_{\text{ПР-3}} = 1$.

Отже, програмою може бути передбачено модернізацію 1 електровоза у рік. Економію поточних витрат з урахуванням парку модернізованих електровозів розраховуємо в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Економія поточних витрат по роках розрахункового періоду

Роки	Програма модернізації	Експлуатаційний парк електровозів	Економія поточних витрат на об'єм впровадження модернізованих електровозів грн.
2025	1,0	1,0	781421,1
2026	1,0	2,0	1562842,2
2027	1,0	3,0	2344263,3
2028	1,0	4,0	3125684,4
2029	1,0	5,0	3907105,5
2030	1,0	6,0	4688526,6
2031	1,0	7,0	5469947,7
2032	1,0	8,0	6251368,8
2033	1,0	9,0	7032789,9
2034	1,0	10,0	7814211,0
Разом			42978156,0

У складі одночасних витрат розгляду заходу необхідно врахувати на НДОКР, та витрати, пов'язані з модернізацією електровоза в плані оснащення ТЕД.

Одноразові витрати на модернізацію парку електровозів наведені в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Одноразові витрати на модернізацію електровозів

Рік проведення модернізації	Кількість модернізованих електровозів	Витрати на модернізацію по рокам розрахункового періоду, грн.
2024	1,0	1123744,8
2025	1,0	1123744,8
2026	1,0	1123744,8
2027	1,0	1123744,8

2028	1,0	1123744,8
2029	1,0	1123744,8
2030	1,0	1123744,8
2031	1,0	1123744,8
2032	1,0	1123744,8
2033	1,0	1123744,8
Разом	10	11237448,0

7.5 Розрахунковий період економічного ефекту

Економічний ефект від оснащення електровозів модернізованими ТЕД розраховано в таблиці 7.8.

Розрахунки засвідчують, що на другому році експлуатації модернізованого електровоза прибуток перевищить капітальні вкладення

Таблиця 7.8 – Визначення економічного ефекту, тис. грн.

Рік розрахункового періоду	Економія поточних витрат (прибуток) p_t	Одноразові витрати K_t		Прибуток за вирахуванням одноразових витрат $p_t - K_t$	Коефіцієнт приведення до розрахункового року α_t	Економічний ефект приведення до розрахункового року $(p_t - K_t) \cdot \alpha_t$
		На НДОКР	На модернізацію			
2024		500000		-500000	1,000	-500000
2025	781421,1		1123744,8	-342323,7	0,9091	-311206,5
2026	1562842,2		1123744,8	439097,4	0,8264	362870,1
2027	2344263,3		1123744,8	1220518,5	0,7513	916975,5
2028	3125684,4		1123744,8	2001939,6	0,6830	1367324,7
2029	3907105,5		1123744,8	2783360,7	0,6209	1728188,6
2030	4688526,6		1123744,8	3564781,8	0,5645	2012319,3
2031	5469947,7		1123744,8	4346202,9	0,5132	2230471,3
2032	6251368,8		1123744,8	5127624	0,4665	2392036,5
2033	7032789,9		1123744,8	5909045,1	0,4241	2490071,6
2034	7814211,0		1123744,8	6690466,2	0,3855	2579174,7
Разом	42978156,0	500000	11237448	31240709		15268265,0

Отже, економічний ефект від модернізації 10 електровозів за розрахунковий період (10 років) складає 15268,2 тис. грн.

Висновки

1. Для поліпшення комутації тягових двигунів пульсуючого струму раціонально застосовувати форсоване збудження додаткових полюсів.
2. Запропоноване схемотехнічне рішення дозволить збільшити міжремонтний пробіг колекторних двигунів не менш, ніж у 1,2-1,4 рази при експлуатації їх в умовах пульсуючого живлення.
3. Схемно-конструкційний метод компенсації вихрових струмів можна застосовувати при проектуванні та виготовленні нових зразків тягових двигунів для рухомого складу, а також при модернізації та вдосконаленні тягових двигунів, які знаходяться в експлуатації.
4. Оснащення електровозів ВЛ80 модернізованими ТЕД знижує виробітку колектору та знос електрощіток.
5. Доцільність обладнання тягового двигуна НБ-418К форсуючим пристроєм підтверджена економічним розрахунком.
6. Незважаючи на значні переваги в експлуатації електровозів ВЛ80, залізниці України потребують створення найближчим часом нових серійних електровозів сучасного покоління з асинхронним приводом і заміни існуючого, морально і фізично застарілого парку локомотивів, виготовленого ще в 60-70 роки минулого століття.

Список використаних джерел

1. Безрученко, В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу [Текст] : [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2003. – 248 с.
2. Блиндюк, В. С. Аналіз методів та засобів контролю якості комутації тягових двигунів локомотивів [Текст] / В. С. Блиндюк // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 260-266.
3. Данилевський, В. І. Застосування сучасних систем електроізоляційних матеріалів класу нагрівостійкості F, H і C [Текст] / В. І. Данилевський, В. М. Тарасюк, В. В. Данилевський // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології». – 2015. – Вип. 26-27. – С. 39-46.
4. Карпенко, Н. П. Вдосконалення колекторних тягових двигунів для рухомого складу при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Надія Петрівна Карпенко. – Харків, 2002. – 19 с.
5. Панасенко, Н. М. Основні вимоги до нового покоління вітчизняних електровозів для вантажної і пасажирської поїзної роботи [Текст] / Н. М. Панасенко // Електротехніка і електромеханіка, 2005. – № 1. – С. 101–105.
6. Проектування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Ципленков, О.Б. Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.
7. Калиниченко Ю.С., Кузнецов А.І. Тягові електричні машини. Двигуни постійного струму. – Х.: ХНАМГ, 2004. – 218 с.
8. Флора В.Д. Тягові електричні двигуни. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. – 263 с.

9. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник /М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
10. Студентська навчальна звітність. Текстова частина (пояснювальна записка). Загальні вимоги до побудови, викладення та оформлення. Методичний посібник з додержання вимог нормоконтролю у студентській навчальній звітності [Текст] : методичний посібник / Л. М. Козар [та ін.]. – Харків : УкрДАЗТ, 2014. – 58 с.
11. Впровадження інновацій у сферу вагоноремонтного підприємства та їх економічна ефективність[Текст] : методичні вказівки до виконання економічної частини дипломних проектів / Ю. Є. Калабухін, І. Е. Мартинов, Т. О. Тимофєєва, В. Г. Равлюк. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – 38 с.
12. Дикань, В. Л. Економіка і організація локомотивного господарства [Текст] : підручник / В. Л. Дикань, Ю. Є. Калабухін, В. О. Зубенко, І. В. Токмакова, Т. М. Юсупова. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – 410 с.
13. Калініченко, С. П. Компенсаційна обмотка двигуна постійного струму при пульсуючому живленні [Текст] / С. П. Калініченко, Ю. С. Калініченко, Н. П. Карпенко // Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електричних системах транспорту : збірник наукових праць ХарДАЗТ. – 2000. – Вип. 39. – С. 55-60.
14. Українська залізниця: міжнародний техніко-економічний журнал. – 2018. – № 10 (64).
15. Загірняк М.В. Електричні машини [Текст]: підручник/ М.В.Загірняк, Б.І.Невзлін. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
16. Електровоз ВЛ80. Руководство з експлуатації. Опис і робота. Електричні схеми.
17. Патент № 35022А. Машина постійного струму [Текст] / Ю.С. Калініченко, Н.П. Карпенко; зареєстровано в Держреєстрі України; 15.03.01, Бюл. № 2.

Український державний університет залізничного транспорту

Механіко-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

до кваліфікаційної роботи

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПУЛЬСУЮЧОГО
СТРУМУ

Розробив студент групи 214-ЕЕ-Д23
спеціальності 273
освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»



Андрій СТЕЛЬМАХ

Підвищення надійності тягових двигунів пульсуючого струму



Загальна характеристика кваліфікаційної роботи

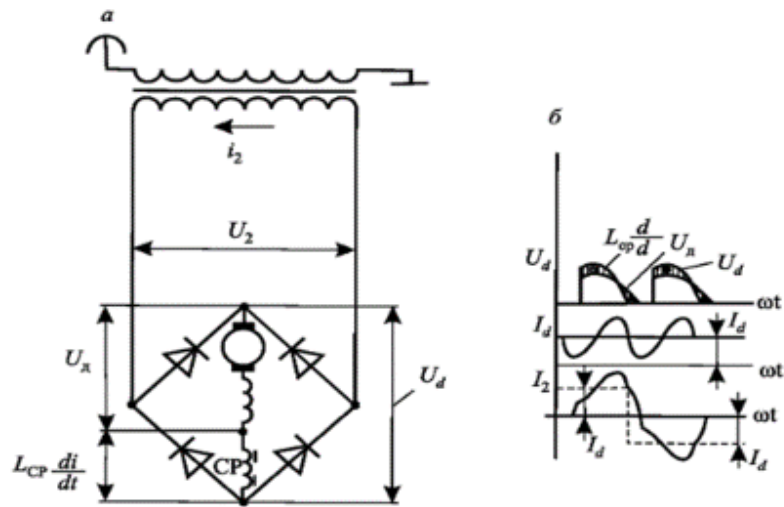
Актуальність дослідження. Прийняті раніше при створенні двигунів пульсуючого струму заходи є недостатніми, лише 60% тягових колекторних двигунів рухомого складу змінного струму витримують міжремонтні терміни експлуатації. Саме тому в роботі розглядається активний метод компенсації вихрових струмів у тягових двигунах і пропонується вдосконалення їх конструкції.

Метою дослідження є вдосконалення конструкції тягового двигуна шляхом покращення його комутаційних властивостей на основі використання активних методів компенсації вихрових струмів для підвищення ефективності та надійності функціонування рухомого складу.

Об'єктом дослідження є процес удосконалення колекторних тягових двигунів при пульсуючій напрузі живлення.

Предметом дослідження є магнітне коло тягових двигунів.

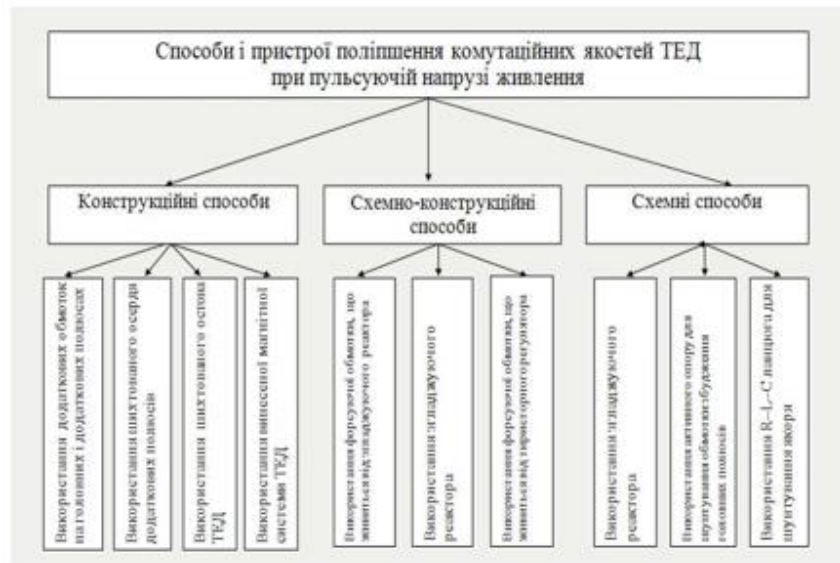
Вплив пульсацій випрямленого струму на процес комутації



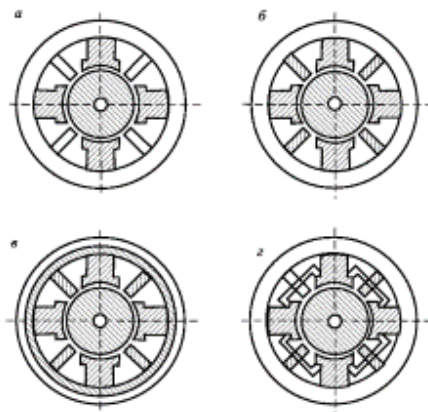
Вплив пульсацій струму на роботу тягових двигунів

1. Трансформаторна ЕРС у комутуючій секції якоря за рахунок пульсації потоку головних полюсів, що співрозмірна з реактивною ЕРС.
2. Розбіжність за фазою реактивної і комутуючої ЕРС унаслідок зсуву за фазою пульсацій струму якоря і пульсацій потоку допоміжних полюсів.
3. Додаткові магнітні втрати.
4. Додаткові втрати в обмотках.

$$K_{nl} \cong \frac{K_{nu} U_B}{4\pi f_c \left(L_p + \frac{L_g}{m} \right) \cdot I \cdot m}$$



Шихтування магнітної системи ТЕД пульсуючого струму



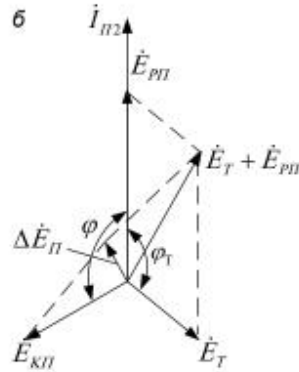
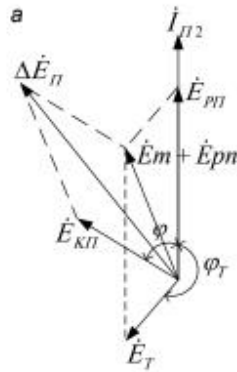
• Конструкція ДП



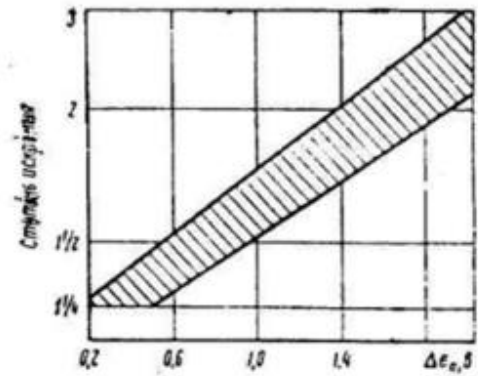
- а - ТЕД постійного струму
- б - шихтовані ДП
- в - часткове шихтування остову
- г - застосування КО

Оцінка рівня небалансної ЕРС

- Векторна діаграма небалансних ЕРС

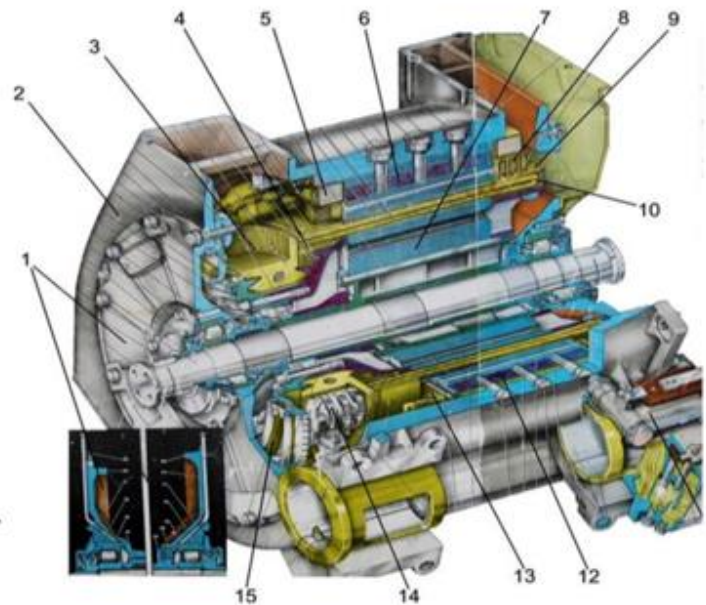


- Залежність ступеня іскріння від небалансної ЕРС

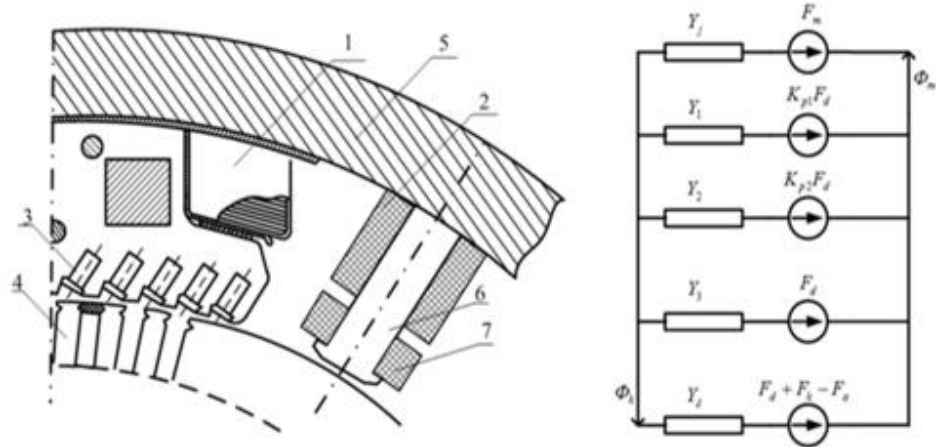


× Тяговий двигун НБ-418К

- серія електровоза – ВЛ80;
- тип струму – пульсуючий;
- напруга, $U = 950 \text{ В}$;
- номінальний струм, $I_a = 820 \text{ А}$;
- діаметр якоря, $D_a = 660 \text{ мм}$;
- кількість пазів якоря, $z = 87$;
- кількість колекторних пластин, $k = 348$;
- кількість активних провідників, $N = 696$;
- розмір міді обмотки якоря, $b_{\text{мр}} \times h_{\text{мр}} = 3,53 \times 6,9 \text{ мм}$;
- кількість полюсів, $2p = 6$;
- розмір паза якоря, $b_z, v_n = 10 \times 42,2 \text{ мм}$;
- довжина пакета якоря, $l_a = 385 \text{ мм}$;
- магнітний потік, $\Phi_n = 0,09 \text{ Вб}$;
- повітряний проміжок під головним полюсом, $\delta_a = 4,7 \text{ мм}$;
- повітряний проміжок під додатковими полюсами, $\delta_a = 7 \text{ мм}$.



Ескіз міжполюсного вікна та схема заміщення магнітного кола ДП тягового двигуна НБ-418К



Методика розрахунку магнітних потоків ДП

$$F_{d0} = \frac{Y_j (\dot{F}_n + \dot{F}_a) + Y_1 (K_{p1} F_d - \dot{F}_{d1}) + \dots + Y (K_{pj} F_d - \dot{F}_j) + Y \delta (F_d + F_k - F_a - F_{d0})}{Y_j + Y_k}$$

$$\Phi_n = (F_{d0} - \dot{F}_n - \dot{F}_a) \cdot Y_j$$

$$\Phi_1 = (K_{p1} F_d - \dot{F}_{d1} - \dot{F}_{d0}) \cdot Y_1$$

$$\Phi_i = (K_{pi} F_d - F_{di} - F_{d0}) \cdot Y_i$$

$$\Phi_k = (F_d + F_k - F_a - F_{d0} - F_{d0}) \cdot Y_k$$

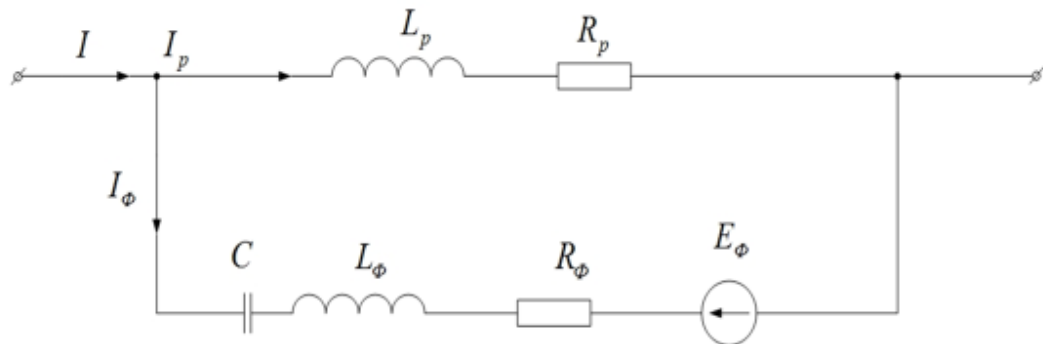
$$F_{d0} = \gamma Y_j i + \frac{\dot{F}_n + \dot{F}_a}{1 + \gamma} - \frac{\gamma}{1 + \gamma} (\dot{F}_{d1} Y_1^* + \dots + \dot{F}_{dj} Y_j^* + \dot{F}_{dk} Y_k^*)$$

$$Y_i = \left[\left(\frac{W_d + W_k}{a_d} - W_a \right) \cdot Y_i^* + \frac{W_d}{a_d} (K_{p1} Y_1^* + \dots + K_{pj} Y_j^*) \right] \frac{Y_k}{1 + \gamma}$$

$$\dot{\Phi}_n = Y_j Y_i^* i - \frac{Y_k}{1 + \gamma} (\dot{F}_n + \dot{F}_a + \dot{F}_{d1} Y_1^* + \dots + \dot{F}_{dj} Y_j^* + F_{dk} Y_k^*)$$

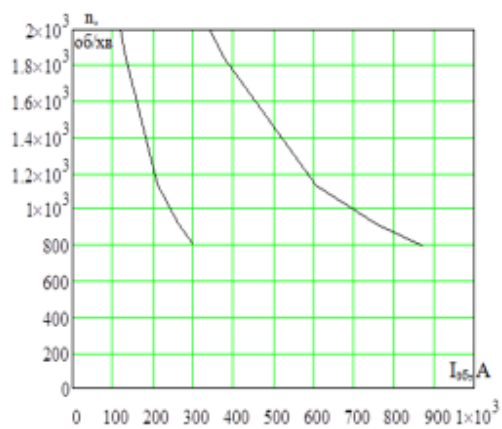
$$\dot{\Phi}_k = \left(\frac{W_d + W_k}{a_d} - W_a - \gamma Y_i^* \right) Y_k \cdot i - Y_k \frac{1}{1 + \gamma} \left[\frac{\dot{F}_n + \dot{F}_a + \dot{F}_{dk} [1 + \gamma (1 - Y_i^*)]}{-\gamma (\dot{F}_{d1} Y_1^* + \dots + \dot{F}_{dj} Y_j^*)} \right]$$

Електрична схема форсованого збудження ДП

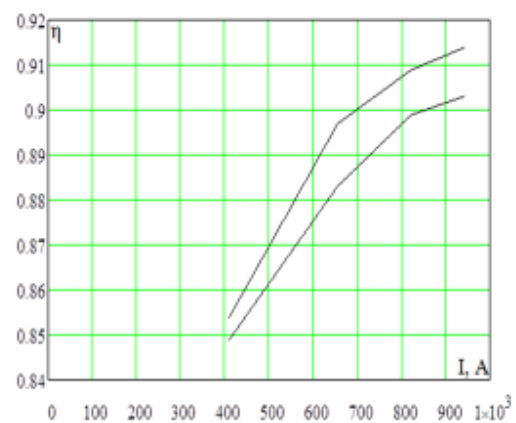


Електромеханічні характеристики двигуна

- Швидкісна характеристика



- Характеристика ККД



Візок електровоза ВЛ80

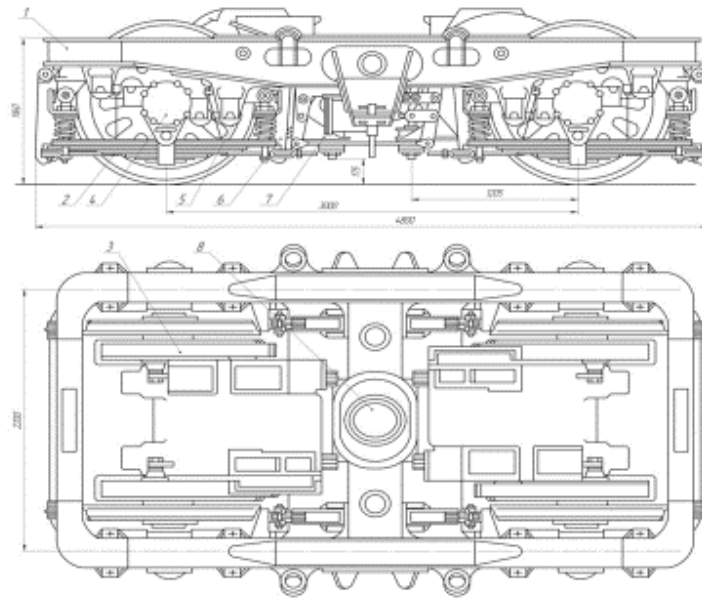
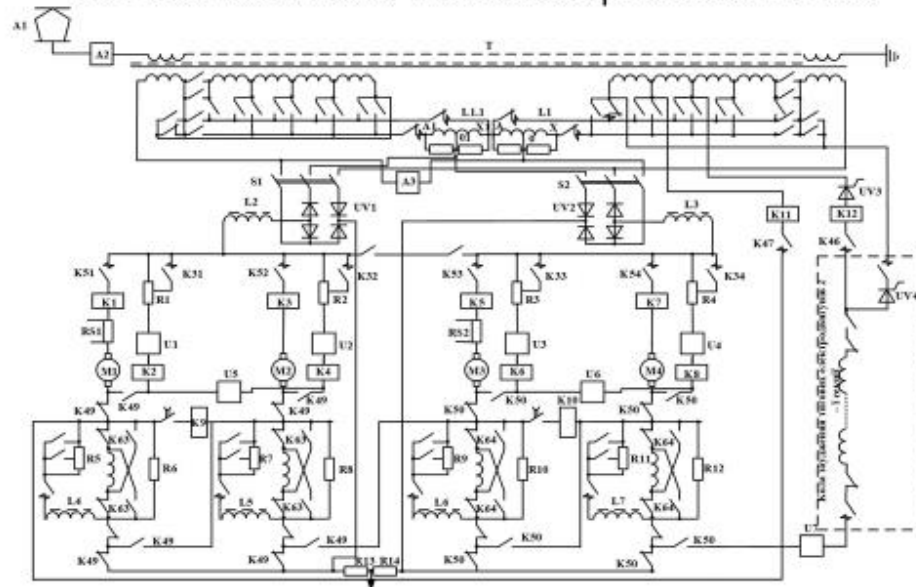


Схема силових кіл електровоза ВЛ80



Вихідні данні для розрахунку економічного ефекту

№ п/п	Найменування показника	Величина показника	1	2	3
1	2	3			
1	Середній строк служби електрошідки $t_{\text{сш}}^{\delta}$, міс	7	9	Міжремонтний пробіг, тис. км КР-2	2600
2	Середній строк служби електрошідки при використанні модернізованого ТЕД, $t_{\text{сш}}^{\text{н}}$, міс	12		КР-1	960
3	Трудосмість зміни однієї електрошідки, $B_{\text{н}}$ чол. год.	0,9		ПР-3	480
4	Годинна тарифна ставка слюсаря при відрядній оплаті праці, $C_{\text{т}}$, грн.	74,43	10	Очікуване збільшення міжремонтного пробігу, $P_{\text{н}}\%$	20
5	Коефіцієнт, що враховують: додакову заробітну плату, $K_{\text{доп}}$ нарахування на заробітну плату, $K_{\text{нап}}$ премії, $K_{\text{пр}}$	1,1 1,22 1,25	11	Собівартість одиниці ремонту ТЕД в об'ємі ремонту, грн. КР-2 КР-1 ПР-3	418690 315780 156325
6	Ціна однієї електрошідки, $C_{\text{сш}}$, грн.	3250	12	Нормативний строк служби електровоза $t_{\text{н}}$ рік	40
7	Кількість електрошідок на ТЕД, $n_{\text{сш}}$, штук	12	13	Фактичний строк служби електровоза $t_{\text{ф}}$ років	30
8	Кількість ТЕД на електровозі, $n_{\text{ТЕД}}$, штук	8	14	Середньодобовий пробіг електровоза, $S_{\text{д}}$, км	415
			15	Кількість відмов ТЕД з причини кругового вогню по колектору на млн. км пробігу	4,06
			16	Частка витрат на ремонт колектору % від загальних витрат на одиницю ремонту ТЕД	60
			17	Експлуатаційний парк електровозів, $M_{\text{ел}}$	10

Висновки

- 1. Для поліпшення комутації тягових двигунів пульсуючого струму раціонально застосовувати форсоване збудження додаткових полюсів.
- 2. Запропоноване схемотехнічне рішення дозволить збільшити міжремонтний пробіг колекторних двигунів не менш, ніж у 1,2-1,4 рази при експлуатації їх в умовах пульсуючого живлення.
- 3. Схемно-конструкційний метод компенсації реакції вихрових струмів можна застосовувати при проектуванні та виготовленні нових зразків тягових двигунів для рухомого складу, а також при модернізації та вдосконаленні тягових двигунів, які знаходяться в експлуатації.
- 4. Оснащення електровозів ВЛ80 модернізованими ТЕД знижує виробітку колектору та знос електрошідок.
- 5. Доцільність обладнання тягового двигуна НБ-418К форсуючим пристроєм підтверджена економічним розрахунком.
- 6. Незважаючи на значні переваги в експлуатації електровозів ВЛ80, залізниці України потребують створення найближчим часом нових серійних електровозів сучасного покоління з асинхронним приводом і заміни існуючого, морально і фізично застарілого парку локомотивів, виготовленого ще в 60-70 роки минулого століття.