

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць»

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра

на тему: «Проект тягового електропривода вантажного електровоза змінного струму.»

за освітньою програмою: «Електричний транспорт»

зі спеціальності: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Виконав: студент групи «ЕТ19120»

	_____	/Максим КОВАЛЬ/
	(підпис студента)	(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
Керівник:	_____	/проф. Андрій АФАНАСОВ/
	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
Нормоконтролер:	_____	/професор Андрій Афанасов/
	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Дніпро – 2022 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Faculty «Energy Process Control»
Department «Electric rolling stock of railways»

Explanatory Note
to Bachelor's Thesis

on the topic: «Project of traction electric drive of freight electric locomotive of
alternating current.»
according to educational curriculum «Electrical Transport»
in the Speciality: «141 Electrical energetics, electrical engineering and
electromechanics»

Done by the student of the group ET19120:	<u>/Maksym KOVAL/</u>
Scientific Supervisor:	<u>/Andrii AFANASOV/</u>
Normative controller:	<u>/Andrii AFANASOV/</u>

РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить 80 сторінок основного тексту, 8 рисунків, 7 таблиць, 9 джерел.

Об'єктом розробки є колекторний тяговий електропривод вантажного електровозу змінного струму.

У першому розділі дипломного проекту проведено розрахунок номінальних параметрів тягового електропривода вантажного електровоза для водіння поїздів на дільниці змінного струму з відомими значеннями маси поїзда, швидкості руху та уклону розрахункового підйому.

У другому розділі проведено розрахунок основних параметрів тягового двигуна пульсуючого струму за номінальними даними, які встановлено та прийнято у першому розділі.

Третій розділ магістерської роботи присвячений вибору структури силової схеми електровоза змінного струму з чотирьохзонним фазо - імпульсним керуванням напруги на тягових двигунах.

Четвертий розділ присвячено виконанню розрахунків зовнішніх характеристик перетворювача електровозу в режимі тяги та рекуперативного гальмування.

Ключові слова: електровоз, змінний струм, тяговий електричний двигун, фазо-імпульсне керування, випрямляч, інвертор, тиристор, зовнішні характеристики, автоматичне керування.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

стор.

Вступ.....	
1	Визначення номінальних параметрів тягового електропривода.....
2	Розрахунок тягового електричного двигуна пульсуючого струму..
2.1	Вибір основних параметрів тягового редуктора і геометричних розмірів елементів двигуна.....
2.2	Розрахунок активного шару якоря.....
2.3	Розрахунок компенсаційної обмотки.....
2.4	Розрахунок магнітного кола.....
2.5	Розрахунок додаткових полюсів.....
2.6	Вибір щіток.....
2.7	Розрахунок електромеханічних характеристик.....
3	Вибір структури силової схеми тягового електропривода
4	Розрахунок характеристик ВПІ в режимах тяги та рекуперативного гальмування
4.1	Розрахунок зовнішньої характеристики перетворювача в режимі тяги.....
4.2	Розрахунок зовнішньої характеристики перетворювача в режимі рекуперативного гальмування
	Висновки

					Проект тягового електропривода вантажного електровозу змінного струму				
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Коваль М.О. .				Розрахунково – пояснювальна записка		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Афанасов А.М						у		
Реценз.							УДУНТ, ЕТ19120		
Н. Контр.	Афанасов А.М								
Затверд.	Афанасов АМ								

ВСТУП

Ефективність транспортної системи держави, яка обумовлює інтенсивність її економічного розвитку, багато в чому визначається рівнем технічного стану рухомого складу і колійної структури залізниць, на частку яких в Україні доводиться до 50% всього внутрішнього вантажообігу і до 40% пасажирських перевезень.

Необхідність інтенсифікації використання тягового рухомого складу, що безпосередньо здійснює перевезення, формує жорсткі вимоги до високої надійності локомотивів, забезпечення безпеки і безперебійності руху поїздів.

Проблема підвищення тягових якостей локомотивів не є новою і з'явилася разом з появленням самого залізничного транспорту. Підвищення потужності вантажних електровозів, а також їх надійності завжди було одними з важких задач локомотивобудування.

Одним з основних напрямків підвищення ефективності локомотивної тяги є розробка нових технічних рішень як в галузі проектування тягових електричних двигунів, так і в галузі розробки силових систем керування вантажних електровозів.

Метою магістерської роботи є розробка тягового електропривода вантажного електровоза змінного струму, який може ефективно використовуватися на заданій ділянці залізниці з відомими значеннями середньої маси поїздів та швидкості руху на критичному підйомі з відомим уклоном.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення цієї мети в роботі було поставлено та вирішено наступні задачі:

- розрахунок номінальних параметрів тягового електроприводу вантажного електровозу змінного струму;
- розрахунок тягового електричного двигуна пульсуючого струму;
- розробка силової схеми вантажного електровоза змінного струму;
- розробка тягового перетворювача електровоза;
- розрахунок характеристик ВІП електровоза в режимах тяги та рекуперативного гальмування.

Тяговий електропривод, що спроектовано, відрізняється високими показниками енергетичної ефективності та надійності. В якості тягових використані електричні двигуни пульсуючого струму. При регулюванні потужності електропривода в режимах тяги та рекуперативного гальмування використано чотирьохзонне фазо-імпульсне регулювання напруги, яке дуже добре зарекомендувало себе на існуючому електрорухомому складі змінного струму.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ВИЗНАЧЕННЯ НОМІНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Вибір номінальних параметрів тягових двигунів електровозу визначає раціональність використання тягового рухомого складу на ділянці з заданим планом та профілем колії. Метою даного розділу магістерської роботи є визначення номінальних даних тягового електричного двигуна пульсуючого струму електровозу змінного струму. Вихідними даними для такого розрахунку є: величина розрахункового підйому, розрахункова швидкість електровоза та маса состава на даній ділянці залізниці.

До основних номінальних параметрів тягового електропривода електровоза відносяться:

- номінальна потужність тягового двигуна;
- номінальна напруга двигуна;
- тип тягової передачі;
- швидкість електровоза в тривалому режимі;

Всі вітчизняні вантажні електровози виконано з тяговою передачею першого класу. Обираємо тягову передачу з опорно-осьовим підвішуванням тягового двигуна та опорно-осьовим підвішуванням тягового редуктора.

Номінальна напруга тягового двигуна пульсуючого струму електровоза змінного струму обирається в межах 900 – 1200 В [1].

Приймаємо номінальну напругу тягового двигуна

$$U_H = 1000 \text{ В.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Максимальна напруга на колекторі тягового двигуна з урахуванням того, що максимальна напруга на струмоприймачі 29000 В та з урахуванням падаючої зовнішньої характеристики випрямляча

$$U_{\text{кmax}} = 1200 \text{ В.}$$

Максимальна напруга ізоляції відносно корпусу

$$U_{\text{max}} = 1200 \text{ В.}$$

Для заданої розрахункової сили тяги маса складу вантажного поїзда визначається величиною розрахункового підйому зі сталою швидкістю. При русі поїзда по розрахунковому підйому запас його кінетичної енергії вичерпується на початковій частині підйому і швидкість руху досягає сталої значення. При подальшому русі сили опору руху поїзда долаються тільки за рахунок сили тяги електровоза. Таким чином, під розрахунковим підйомом треба розуміти найбільш важкий в обраному напрямку руху підйом, довжина якого достатня для того, щоб швидкість поїзда досягла сталої значення. Маса складу, що відповідає реалізації на розрахунковому підйомі параметрів розрахункового режиму електровоза, визначається розрахунковою силою тяги, величиною уклону та основним опором руху.

Сила тяги електровоза в ньютонах для заданої маси складу та відомому значенні розрахункового підйому розрахункова може бути визначена за формулою [2]

$$F_{\text{кр}} = 9,8 \cdot [Q(w''_0 + i_p) + P(w'_0 + i_p)],$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ

Номінальні параметри тягового електричного двигуна:

- номінальна потужність (тривалий режим) $P_H = 720$ кВт;
- номінальна напруга $U_H = 1000$ В;
- швидкість електровозу в тривалому режимі $V_{ен} = 48$ км/год;
- максимальна швидкість електровоза $V_{ем} = 120$ км/год.

2.1 Вибір основних параметрів тягового редуктора і геометричних розмірів елементів двигуна

Виходячи з того, що майже всі тягові двигуни електровозів являються шестиполюсними, приймаємо $2p = 6$, а обмотку якоря – простою петльовою. Аналізуючи величини діаметрів якоря в існуючих двигунах, та орієнтуючись н опит існуючих розрахунків [1,4], обираємо діаметр якоря двигуна в межах $620 \div 740$ мм. Діаметр колектора обираємо виходячи із умови [1]

$$D_k = (0,75 \div 0,8) D_a.$$

Приймаємо, що максимально допустима швидкість поверхні колектора (окружна швидкість) $V_{km} = 50$ м/с, а максимальна швидкість поверхні якоря $V_{ям} = 60$ м/с. Розрахунок ведемо з урахуванням, що бандажі колісних пар середньо зношені. Таким чином маємо:

$$D_{\delta} = 1200 \text{ мм};$$

$$D_a = 740 \text{ мм};$$

$$D_k = 590 \text{ мм}.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо попередньо передавальне число редуктора [1]

$$\mu = \frac{D_{\delta} \cdot V_{\kappa m} \cdot 60}{5,3 \cdot \pi \cdot D_{\kappa} \cdot V_{\varepsilon m}} = \frac{1,2 \cdot 50 \cdot 60}{5,3 \cdot 3,14 \cdot 0,59 \cdot 120} = 3,05.$$

Визначаємо діаметр зубчатого колеса D_z

$$D_z = D_{\delta} - 2(b + \Delta) = 1250 - 2 \cdot (130 + 25) = 940 \text{ мм}.$$

Визначимо попередньо діаметр малої зубчастої шестерні d_z

$$d_z = \frac{D_z}{\mu} = \frac{940}{3,05} = 308 \text{ мм}.$$

Число зубців колеса і малої шестерні:

$$Z = \frac{D_z}{m} = \frac{940}{12} = 78 ;$$
$$z = \frac{d_z}{m} = \frac{308}{12} = 26.$$

Передавальне число редуктора

$$\mu = \frac{Z}{z} = \frac{78}{26} = 3.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевіримо максимальну окружну швидкість якоря

$$V_{am} = \frac{5,3 \cdot \pi \cdot D_a \cdot V_{эм} \cdot \mu}{D_{\delta} \cdot 60} = \frac{5,3 \cdot 3,14 \cdot 0,74 \cdot 120 \cdot 3}{1,2 \cdot 60} = 56 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Перевіримо максимальну окружну швидкість колектора

$$V_{км} = \frac{5,3 \cdot \pi \cdot D_{\kappa} \cdot V_{эм} \cdot \mu}{D_{\delta} \cdot 60} = \frac{5,3 \cdot 3,14 \cdot 0,59 \cdot 120 \cdot 3}{1,2 \cdot 60} = 49 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Номінальна частота обертання двигуна

$$n_H = 5,3 \cdot \frac{\mu}{D_{\delta}} \cdot V_{эм} \cdot 10^3 = \frac{5,3 \cdot 3 \cdot 48 \cdot 10^3}{1200} = 635 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Максимальна частота обертання двигуна

$$n_m = n_H \frac{V_{эм}}{V_{эH}} = 635 \cdot \frac{120}{48} = 1590 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

2.2 Розрахунок активного шару якоря

Для тягового двигуна застосовується проста петльова обмотка, у якій число паралельний гілок і полюсів $2a = 2p$ та крок по колектору

$$y_k = 1.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Полюсне ділення по якорю

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p} = \frac{3,14 \cdot 740}{6} = 387 \text{ мм.}$$

Попередньо обираємо середню міжламельну напругу e_{cp} [1,4]

$$e_{cp} = 16 \text{ В.}$$

Число колекторних пластин (попереднє)

$$K = \frac{2p \cdot U_H}{e_{cp}} = \frac{6 \cdot 1000}{16} = 375.$$

Обираємо число колекторних пластин на паз u_k (3 – 7) у залежності від напруги на затисках двигуна [1]

$$u_k = 3.$$

Число пазів якоря Z (попередньо)

$$Z = K / u_k = 375 / 3 = 125.$$

Уточнюємо число пазів якоря Z (рис.2.11) з урахуванням того, що Z/p повинно бути непарним

$$Z = 123.$$

Остаточне число колекторних пластин

$$K = Z \cdot u_k = 123 \cdot 3 = 369.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Число провідників якоря

$$N = 2 \cdot u_{\kappa} \cdot Z = 2 \cdot 3 \cdot 123 = 738 .$$

Остаточно середня міжламельна напруга

$$e_{cp} = \frac{2p \cdot U_H}{K} = \frac{6 \cdot 1000}{369} = 16,2 \text{ В.}$$

Колекторне ділення

$$t_{\kappa} = \frac{\pi \cdot D_{\kappa}}{K} = \frac{3,14 \cdot 590}{369} = 5,02 \text{ мм.}$$

Номінальний струм

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{U_n \cdot \eta_{\partial\partial}} = \frac{720 \cdot 10^3}{1000 \cdot 0,94} = 765 \text{ А.}$$

Струм паралельної гілки якоря

$$i_a = \frac{I_n}{2a} = \frac{765}{6} = 128 \text{ А.}$$

Лінійне навантаження якоря

$$A = \frac{i_a \cdot N}{\pi \cdot D_a} = \frac{128 \cdot 738}{3,14 \cdot 74} = 406 \text{ А/см.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Попередньо вибираємо густину струму в провіднику обмотки якоря j_a і його перетин q_a :

$$j_a = 5 \text{ A/мм}^2;$$

$$q_a = i_a / j_a = 128 / 5 = 25,6 \text{ мм}^2.$$

Приймаємо вертикальний засіб розташування провідників в пазу якоря, вибираємо розміри провідника, уточнюємо його перетин і густину струму:

$$h_{np} \times b_{np} = 4,5 \times 6,3.$$

$$q_a = 27,49 \text{ мм}^2.$$

$$j_a = \frac{i_a}{q_a} = \frac{128}{27,49} = 4,66 \text{ A/мм}^2.$$

Тепловий фактор

$$A \cdot j_a = 406 \cdot 4,66 = 1890.$$

Порівнюємо отримане значення теплового фактора із максимально допустимим значенням. Тепловий фактор не перевищує допустиме значення.

Намагнічуюча сила якоря

$$F_{aq} = A \cdot \frac{\tau}{2} = 406 \cdot \frac{38,7}{2} = 7860 \text{ A}.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приведене до одного полюса число витків обмотки якоря

$$\omega'_a = \frac{N}{8ap} = \frac{738}{8 \cdot 3 \cdot 3} = 10,25.$$

Параметри обмотки якоря:

– результуючий крок обмотки по елементарних пазах або крок по колекторних діленнях

$$y_k = 1;$$

– перший крок по реальних пазах

$$y_{z1} = \frac{Z}{2p} = \frac{123}{6} = 20,5;$$

приймаємо

$$y_{z1} = 20;$$

– другий крок по реальних пазах

$$y_{z2} = y_{z1} - \frac{1}{u_k} = 20 - \frac{1}{3} = 19,67;$$

– перший частковий крок по елементарних пазах

$$y_1 = y_{z1} \cdot u_k = 20 \cdot 3 = 60 ;$$

– другий частковий крок по елементарних пазах

$$y_2 = y_1 - 1 = 60 - 1 = 59 .$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 - Заповнення паза якоря

Ширина, мм	
Мідь	6,3
Ізоляція провідника – стрічка поліамідна завтовшки 0,05 мм, один шар у напівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 1$	0,2
Ізоляція пакета – стрічка поліамідна завтовшки 0,05 мм, чотири шари у напівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 4$	0,8
Ізоляція покривна – склострічка завтовшки 0,05 мм, один шар впритул $0,1 \times 1 \times 2$	0,2
Зазор на укладання	0,25
Ширина паза в світлі b_n	7,75
Припуск на штамповку	0,15
Ширина паза в штампі $b'_n = b_n + 0,15$	7,9
Висота, мм	
Мідь $4,5 \times 3 \times 2$	27
Ізоляція провідника – стрічка поліамідна завтовшки 0,05 мм, один шар у напівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 6$	1,2
Ізоляція пакета – стрічка поліамідна завтовшки 0,05 мм, чотири шари у напівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 4 \times 2$	1,6
Ізоляція покривна – склострічка завтовшки 0,05 мм, один шар впритул $0,1 \times 1 \times 2$	0,4
Прокладки товщиною по 0,3 мм, дві – під клин і одна – на дно паза $0,3 \times 3$	0,9
Клин	4
Висота паза в світлі h_z	35,1
Висота паза в штампі $h'_z = h_z + 0,1 = 35,1 + 0,1 = 35,2$	35,2
Відношення $\frac{h'_z}{b'_n} = \frac{35,2}{7,9} = 4,46$	4,46

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Укорочення по пазах

$$\varepsilon_n = 1/2.$$

Укорочення по колекторних пластинах

$$\varepsilon_\kappa = \frac{K}{2p} - y_1 = \frac{369}{6} - 60 = 1,5.$$

Зубцевий крок по поверхні якоря

$$t_1 = \frac{\pi D_a}{Z} = \frac{3,14 \cdot 740}{123} = 18,9 \text{ мм.}$$

Ширина головки зубця

$$b_{z_1} = t_1 - b'_n = t_1 - (b_n + 0,15) = 18,9 - 7,9 = 11 \text{ мм.}$$

Зубцевий крок по дну пазів

$$t_2 = \frac{\pi(D_a - 2h'_z)}{Z} = \frac{3,14(740 - 2 \cdot 35,2)}{123} = 17,1 \text{ мм.}$$

Ширина основи зубця

$$b_{z_2} = t_2 - b'_n = t_2 - (b_n + 0,15) = 17,1 - 7,9 = 9,2 \text{ мм.}$$

Зубцевий крок у розрахунковому перетині

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_{\frac{1}{3}} = \frac{\pi \left(D_a - \frac{4}{3} h'_z \right)}{Z} = \frac{3,14 \left(740 - \frac{4}{3} \cdot 35,2 \right)}{123} = 17,8 \text{ мм.}$$

Ширина зубця розрахункова

$$b_{z_{\frac{1}{3}}} = t_{\frac{1}{3}} - b'_n = t_{\frac{1}{3}} - (b_n + 0,15) = 17,8 - 7,9 = 9,9 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт форми зубця

$$K_z = \frac{t_{\frac{1}{3}}}{0,97 \cdot b_{z_{\frac{1}{3}}}} - 1 = \frac{17,8}{0,97 \cdot 9,9} - 1 = 0,86 .$$

Вибираємо довжину активної частини якоря

$$L_a = 380 \text{ мм.}$$

Середня довжина одного провідника обмотки якоря

$$l_N = l_{\text{лоб}} + l_a = 530 + 380 = 910 \text{ мм.}$$

Опір обмотки якоря при 20°C

$$r_{a20^\circ\text{C}} = \frac{l_N \cdot N}{57 q_a (2a)^2} = \frac{0,91 \cdot 738}{57 \cdot 27,49 \cdot 36} = 0,012 \text{ Ом.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Розрахунок компенсаційної обмотки

Компенсаційну обмотку виконують по схемі з однією паралельною гілкою $a_{ko}=1$, включаючи котушки всіх полюсів в одне послідовне коло. Виходячи з того, що компенсаційна обмотка знищує спотворюючу дію н. с. якоря на полюсній дузі і заданий ступінь компенсації $v_{ko}=1,07 \div 1,17$, знаходимо число витків компенсаційної обмотки на полюсі. Приймаємо розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_\delta=0,7$.

$$w_{ko} = v_{ko} \frac{A \frac{\tau}{2} \cdot \alpha_\delta \cdot a_{ko}}{I_a} = (1,07 \div 1,17) \cdot \frac{406 \cdot 19,4 \cdot 0,7 \cdot 1}{765} = 7,9 \div 8,1.$$

Приймаємо

$$w_{ko} = 8.$$

За умовою охолодження та рівномірного розподілу н.с. компенсаційної обмотки об'єму струму в пазу для великих машин повинен бути

$$I_{z\ ko} \leq 1800 \div 2000 \text{ A}.$$

Кількість ефективних провідників в пазу та число витків в секції

$$N_{z\ ko} = w_{sko} = \frac{I_{z\ ko} \cdot a_{ko}}{I_{an}} = \frac{(1800 \div 2000) \cdot 1}{765} = 2,35 \div 2,61.$$

Приймаємо

$$N_{z\ ko} = w_{sko} = 2.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 - Заповнення паза компенсаційної обмотки

Ширина, мм	
Мідь $4,7 \times 2$	9,4
Ізоляція провідника – стрічка поліамідна завтовшки 0,05 мм, один шар унапівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 2$	0,4
Ізоляція пакета – стрічка поліамідна завтовшки 0,05 мм, чотири шари унапівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 4$	0,8
Ізоляція покривна – склострічка завтовшки 0,05 мм, один шар впритул $0,1 \times 1 \times 2$	0,2
Зазор на укладання	0,6
Ширина паза в світлі $b_{пко}$	11,4
Ширина паза в штампі $b'_{пко} = b_{пко} + 0,2$	11,6
Висота, мм	
Мідь	30
Ізоляція провідника – стрічка поліамідна завтовшки 0,05 мм, один шар унапівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 1$	0,2
Ізоляція пакета – стрічка поліамідна завтовшки 0,05 мм, чотири шари унапівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 4$	0,8
Ізоляція покривна – склострічка завтовшки 0,05 мм, один шар впритул $0,1 \times 1 \times 2$	0,2
Прокладки товщиною по 0,3 мм, 2шт. $0,3 \times 2$	0,6
Клин	5
Зазор на укладання	0,2
Висота паза в світлі $h_{зко}$	37
Висота паза в штампі $h'_{зко} = h_{зко} + 0,1$	37,1

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

М.р.с. компенсаційної обмотки на полюс

$$F_{\kappa o} = \frac{I_{an}}{a_{\kappa o}} \cdot w_{\kappa o} = \frac{765}{1} \cdot 8 = 6120 \text{ A.}$$

Ступінь компенсації реакції якоря

$$\nu_{\kappa o} = \frac{F_{\kappa o}}{\alpha_{\delta} \cdot F_{aq}} = \frac{6120}{0,7 \cdot 7860} = 1,11.$$

Підбираємо провідник розмірами $4,7 \times 30$ мм, перетином $q_{\kappa o} = 140,14 \text{ мм}^2$. Густина струму в компенсаційній обмотці (допускається більше, ніж у якорів на $12 \div 20\%$)

$$j_{\kappa o} = \frac{I_{an}}{a_{\kappa o} \cdot q_{\kappa o}} = \frac{765}{1 \cdot 140,14} = 5,46 \text{ A/мм}^2.$$

Довжина прямолінійної ділянки внутрішньої котушки при виході з паза

$$a = 25 \text{ мм.}$$

Довжина лобової частини напіввитка середньої котушки

$$\begin{aligned} l_{s \kappa o} &= \tau_{\kappa o} \left(1 - \frac{\alpha_{\delta}}{2} \right) + 2a + b_{n \kappa o} \frac{Z_{\kappa o}}{2} + \Delta \left(\frac{Z_{\kappa o}}{2} - 1 \right) = \\ &= 400 \cdot \left(1 - \frac{0,7}{2} \right) + 2 \cdot 25 + 11,4 \cdot \frac{8}{2} + 5 \left(\frac{8}{2} - 1 \right) = 370 \text{ мм.} \end{aligned}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середня довжина витка компенсаційної обмотки

$$l_{cp.ко} = 2(l_{s.ко} + l_m) = 2(370 + 385) = 1510 \text{ мм.}$$

Опір компенсаційної обмотки при 20°C

$$r_{ко} = \frac{2p \cdot w_{ко} \cdot l_{cp.ко}}{57 \cdot a_{ко}^2 \cdot q_{ко}} = \frac{6 \cdot 8 \cdot 1,51}{57 \cdot 1 \cdot 140} = 0,009 \text{ Ом.}$$

Маса міді компенсаційної обмотки

$$m_{мко} = 8,9 l_{cp.ко} \cdot 2p \omega_{ко} \cdot q_{ко} = 8,9 \cdot 1510 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 140,14 \cdot 10^{-6} = 91 \text{ кг.}$$

2.4 Розрахунок магнітного кола

Визначаємо номінальний магнітний потік

$$\Phi = 1,03 \frac{0,96 \cdot U \cdot 60a}{n_{\pi} \cdot N \cdot p} = 1,03 \frac{0,96 \cdot 1000 \cdot 60 \cdot 3}{690 \cdot 738 \cdot 3} = 0,117 \text{ Вб.}$$

Креслимо коло якоря $D_a = 740 \text{ мм}$. По відомому h_z наносимо зубцовий шар.

Приймаємо індукцію в осередді якоря (1,2÷1,4 Т)

$$B_{я} = 1,3 \text{ Т.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт заповнення сталлю

$$K_c = 0,97.$$

Визначаємо активну висоту перетину осердя якоря

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_{\text{я}} \cdot l_a \cdot K_c} = \frac{0,117}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,38 \cdot 0,97} = 0,122 \text{ м.}$$

Величина активного перетину осердя

$$S_a = h_a \cdot l_a \cdot K_c = 0,121 \cdot 0,38 \cdot 0,97 = 0,045 \text{ м}^2.$$

Приймаємо діаметр вентиляційних каналів

$$d_k = 30 \text{ мм.}$$

Приймаємо кількість рядів вентиляційних каналів

$$n_k = 2.$$

Конструктивна висота осердя

$$h'_a = h_a + \frac{1}{2} d_k \cdot n_k = 0,121 + \frac{1}{2} \cdot 0,03 \cdot 2 = 0,124 \text{ м.}$$

Внутрішній діаметр осердя якоря

$$D_i = D_a - 2(h_z + h_a) = 740 - 2(35,1 + 121) = 428 \text{ мм.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо магнітну напругу зубцевого шару компенсаційної обмотки.

Перетин зубцевого шару компенсаційної обмотки

$$S_{z\text{ } \kappa o} = 2(A + B + C - 2b'_{n\text{ } \kappa o}) \cdot l_m \cdot 0,97 = \\ = 2(0,07 + 0,035 + 0,008 - 2 \cdot 0,0116) \cdot 0,385 \cdot 0,97 = 0,067 \text{ м}^2.$$

Приймаємо коефіцієнт розсіяння на цій ділянці $\sigma_{\kappa o} = 1,05$, визначаємо індукцію

$$B_{z\text{ } \kappa o} = \frac{\sigma_{\kappa o} \cdot \Phi}{S_{z\text{ } \kappa o}} = \frac{1,05 \cdot 0,117}{0,067} = 1,83 \text{ Т.}$$

Для цієї індукції напруженість

$$H_{z\text{ } \kappa o} = 163 \text{ А/см.}$$

Довжина магнітного шляху

$$h_{z\text{ } \kappa o} = 3,71 \text{ см.}$$

Магнітна напруга зубцевого шару компенсаційної обмотки

$$F_{z\text{ } \kappa o} = H_{z\text{ } \kappa o} \cdot h'_{z\text{ } \kappa o} = 163 \cdot 3,71 = 605 \text{ А.}$$

Визначимо магнітну напругу ярма якоря.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перетин ярма якоря

$$S_a = \frac{0,97 l_a \left(D_a - D_i - 2h'_z - \frac{4}{3} n_\kappa d_\kappa \right)}{2} =$$
$$= \frac{0,97 \cdot 0,38 \left(0,74 - 0,428 - 2 \cdot 0,0351 - \frac{4}{3} \cdot 2 \cdot 0,03 \right)}{2} = 0,039 \text{ м}^2.$$

Магнітний потік в якорі роздвоюється і магнітна індукція в якорі

$$B_a = \frac{\Phi}{2S_a} = \frac{0,117}{2 \cdot 0,039} = 1,5 \text{ Т.}$$

Для цієї індукції напруженість

$$H_a = 29 \text{ А/см [1].}$$

Довжина магнітного шляху в ярмі якоря

$$L_a = 14,5 \text{ см.}$$

Магнітна напруга в ярмі якоря

$$F_a = H_a \cdot L_a = 29 \cdot 14,5 = 420 \text{ А.}$$

Магнітний перетин зубців якоря

$$S_{z_{1/3}} = \frac{b_{z_{1/3}} \cdot Z \cdot \alpha_\delta \cdot l_a \cdot 0,97}{2p} = \frac{0,0099 \cdot 123 \cdot 0,7 \cdot 0,38 \cdot 0,97}{6} = 0,0523 \text{ м}^2.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункова індукція в зубцях

$$B_{z_{1/3}} = \frac{\Phi}{S_{z_{1/3}}} = \frac{0,117}{0,0523} = 2,24 \text{ Т.}$$

Для цієї індукції знаходимо

$$H_z = 831 \text{ А/см.}$$

Довжина магнітного шляху в зубцях

$$h'_z = 3,51 \text{ см.}$$

Магнітна напруга зубцевого шару якоря

$$F_z = H_z \cdot h'_z = 831 \cdot 3,51 = 2917 \text{ А.}$$

Визначимо магнітну напругу осердя головного полюса

Довжина та ширина осердя:

$$l_m = 385 \text{ мм;}$$

$$b_m = 280 \text{ мм.}$$

Висота осердя полюса

$$h_m = (0,3 \div 0,35) \cdot \tau = 0,3 \cdot 387 = 116,1 \text{ мм.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймаємо коефіцієнт розсіяння для полюса і остову

$$\sigma = 1,25.$$

Перетин осереддя полюса

$$S_m = b_m \cdot l_m \cdot k'_c \cdot k_{cp} = 0,28 \cdot 0,385 \cdot 0,97 \cdot 0,93 = 0,0972 \text{ м}^2.$$

Індукція в осерді полюса

$$B_m = \sigma \frac{\Phi}{S_m} = 1,25 \cdot \frac{0,117}{0,0972} = 1,5 \text{ Т};$$

Напруженість для $B_m = 1,5 \text{ Т}$

$$H_m = 29 \text{ А/см.}$$

Довжина магнітної силової лінії

$$L_m = 9,1 \text{ см.}$$

Магнітна напруга осердя головного полюса

$$F_m = H_m \cdot L_m = 29 \cdot 9,1 = 264 \text{ А.}$$

Визначимо магнітну напругу остову. Приймаємо індукцію в остові

$$B_j = 1,5 \text{ Т.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Максимальна довжина магнітної частини остову

$$l_j = l_a + 0,4D_a = 0,38 + 0,4 \cdot 0,74 = 0,68 \text{ м.}$$

Товщина остову

$$h_j = \frac{\sigma \Phi}{2B_j \cdot l_j} = \frac{1,25 \cdot 0,117}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,68} = 0,071 \text{ м.}$$

Напруженість в остові

$$H_j = 29 \text{ А/см.}$$

Довжина магнітної силової лінії

$$L_j = 15 \text{ см.}$$

Магнітна напруга ділянки між полюсами

$$F_j = H_j \cdot L_j = 29 \cdot 15 = 435 \text{ А.}$$

Магнітна індукція виходу

$$B'_j = \frac{\sigma \Phi}{2h_j(l_m + b_m)} = \frac{1,25 \cdot 0,117}{2 \cdot 0,071(0,385 + 0,28)} = 1,55 \text{ Т.}$$

Напруженість

$$H'_j = 35 \text{ А/см.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Довжина магнітного шляху:

$$L'_m = \frac{b_m}{2} = \frac{28}{2} = 14 \text{ см.}$$

Визначимо магнітну напругу ділянки виходу

$$F'_j = H'_j \cdot L'_j = 35 \cdot 14 = 490 \text{ А.}$$

Визначимо магнітну напругу повітряного зазору.

Середня довжина перетину повітряного зазору

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

Середня індукція в повітряному зазорі

$$B_\delta = \frac{\Phi}{S_\delta} = \frac{\Phi}{\alpha \cdot \tau \cdot l_\delta} = \frac{0,117}{0,7 \cdot 0,387 \cdot 0,383} = 1,13 \text{ Т.}$$

Повітряний зазор і магнітну напругу встановлюємо відповідно до заданих регулювальних властивостей. Приймаємо коефіцієнт стійкості при найменшому ступені збудження

$$K_{y \min} = 0,45.$$

Коефіцієнт регулювання швидкості

$$K_v = \frac{V_{\max}}{V_n} = \frac{120}{48} = 2,5.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт використання потужності приймаємо

$$K'_u = 0,75.$$

Магнітна напруга повітряного зазору

$$F_\delta = K'_u \cdot K_v \cdot \alpha_\delta \cdot F_{aq} \cdot K_{ymin} = 0,75 \cdot 2,5 \cdot 0,7 \cdot 7860 \cdot 0,45 = 4640 \text{ А.}$$

Намагнічуюча сила головного полюса при холостому ході

$$F_o = 1,03(F_z + F_a + F_{zko} + F_m + F_j + F'_j + F_\delta) = \\ = 1,03(2917 + 420 + 605 + 246 + 435 + 490 + 4640) = 9730 \text{ А.}$$

Розмагнічуюча дія реакції якоря

$$F_p = 0,05A \frac{\tau}{2} = 0,05 \cdot 406 \cdot 19,4 = 394 \text{ А.}$$

Повна м.с. головного полюса

$$F_B = F_o + F_p = 9730 + 394 = 10100 \text{ А.}$$

Число витків котушки головного полюса

$$w_B = \frac{F_B}{I_a \cdot \beta_n} = \frac{10100}{765 \cdot 0,98} = 13,5$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймаємо

$$w_B = 14.$$

Намагнічуюча сила головного полюсу

$$F_B = I_a \cdot w_B \cdot \beta_n = 765 \cdot 14 \cdot 0,98 = 10500 \text{ А.}$$

Коефіцієнт насичення

$$K_n = \frac{F_B}{F_\delta} = \frac{10100}{4640} = 2,17.$$

Мінімальний ступінь збудження

$$\beta_{\min} = \frac{\beta_n}{K_n \cdot K_v \cdot K'_u} = \frac{0,98}{2,17 \cdot 2,5 \cdot 0,75} = 0,24.$$

Коефіцієнт стійкості при найменшому ступені збудження

$$K_{y\min} = \frac{F_B \cdot \beta_{\min}}{\alpha_\delta \cdot F_{aq} \cdot \beta_n} = \frac{10100 \cdot 0,24}{0,7 \cdot 7860 \cdot 0,98} = 0,45.$$

По ГОСТ 434-71 вибираємо для обмотки головних полюсів мідну шину розмірами $h_m \times b_m = 4 \times 12$ перетином $q_B = 240 \text{ мм}^2$.

Густина струму в обмотці збудження

$$j_B = \frac{I_B \cdot \beta_n}{q_B} = \frac{765 \cdot 0,98}{240} = 3,12 \text{ А/мм}^2.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Довжина середнього витка котушки головного полюса

$$l_{cp(B)} = 2[(l_m + 15) + (b_m + 5)] + 2\pi r = 2[(385 + 15) + (280 + 5)] + 2 \cdot 3,14 \cdot 30 = 1580 \text{ мм} = 1,58 \text{ м.}$$

Визначимо розміри котушки головного полюса.

Таблиця 2.3 – Розрахунок розмірів котушки головного полюса

Висота, мм	
Мідь 4×14	56
Міжвиткова ізоляція – папір товщиною 0,5 мм, $0,5 \times 13$	6,5
Корпусна ізоляція – склослюдінітова стрічка товщиною 0,13 мм, чотири шари внапівперекривання $0,13 \times 4 \times 2 \times 2$	2,08
Розпушування, відхилення по допусках і вирівнюючі прокладки	2,42
Висота котушки	67
Ширина, мм	
Мідь	60
Корпусна ізоляція – склослюдінітова стрічка товщиною 0,13 мм, Чотири шари внапівперекривання $0,13 \times 4 \times 2 \times 2$	2,08
Виступ міжвиткової ізоляції	0,5
Разом	63

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Опір обмотки збудження при 20°C

$$r_B = \frac{2p \cdot w_B \cdot l_{cp(B)}}{57 \cdot q_B \cdot K_{подр}} = \frac{6 \cdot 14 \cdot 1,58}{57 \cdot 240 \cdot 1} = 0,0097 \text{ Ом.}$$

2.5 Розрахунок додаткових полюсів

Визначаємо число витків котушки додаткового полюса і намагнічуючу силу.

Приймаємо зосередження обмотки у кінця осердя з боку якоря. Це призводить до значного зменшення потоку розсіювання і зменшення числа витків. Для такої конструкції ступень компенсації реакції якоря

$$\nu = 1.15 \div 1.25.$$

Кількість витків додаткового полюса

$$w_q = \nu \omega'_a - w_{\kappa o} = 1,15 \cdot 10,25 - 8 = 3,8.$$

Приймаємо

$$w_q = 4.$$

Обмотка лягає пліском. Оскільки конструкція осердя додаткового полюса вибирається з масивним осердям всередині, то ширина його

$$b_{мд} = 50 \text{ мм.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ширина наконечника додаткового полюса

$$b_{\phi} = (1,0 \div 1,5) t_1 = 1,2 \cdot 18,9 = 23 \text{ мм.}$$

Оскільки один і той же струм протікає в компенсаційній обмотці і котушці додаткового полюса, то дріт для котушки додаткового полюса вибираємо тих же розмірів, що і для компенсаційної обмотки, що вже розраховане.

Таблиця 2.4 - Розрахунок розмірів котушки додаткового полюса

Висота, мм	
Мідь	30
Корпусна ізоляція – стрічка поліамідна товщиною 0,05 мм, чотири шари унапівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 4$	0,8
Покривна ізоляція – склострічка товщиною 0,1 мм, один шар впритул $0,1 \times 2 \times 1$	0,2
Загальна висота котушки	31
Ширина, мм	
Мідь $4,7 \times 4$	18,8
Міжвиткова ізоляція – поліамідна плівка товщиною 0,05 мм, один шар унапівперекривання $0,05 \times 3$	0,15
Корпусна ізоляція – стрічка поліамідна товщиною 0,05 мм, чотири шари унапівперекривання $0,05 \times 2 \times 2 \times 4$	0,8
Покривна ізоляція – склострічка товщиною 0,1 мм, один шар впритул $0,1 \times 2 \times 1$	0,2
Сумарна ширина	20

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Густина струму в обмотці додаткових полюсів

$$j_{\partial} = \frac{I_{ан}}{q_{\partial}} = \frac{765}{140} = 5,46 \text{ А/мм}^2.$$

Ширина котушки додаткового полюса з розпушенням

$$b_{кат} = 22 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка котушки додаткового полюса

$$l_{cp(\partial)} = 2l_m + \pi(b_{m\partial} + b_{кат}) = 2 \cdot 380 + 3,14(50 + 22) = 970 \text{ мм.}$$

Опір обмотки додаткового полюса при 20°C

$$r_{\partial} = \frac{2p \cdot w_D \cdot l_{cp(\partial)}}{57 \cdot q_{\partial}} = \frac{6 \cdot 4 \cdot 0,97}{57 \cdot 140} = 0,0029 \text{ Ом.}$$

Маса міді обмотки додаткових полюсів

$$m_{m\partial} = 8,9 \cdot 2p \cdot w_D \cdot l_{cp(\partial)} \cdot q_{\partial} \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 0,97 \cdot 140 \cdot 10^{-3} = 29 \text{ кг.}$$

2.6 Вибір щіток

Довжина робочої частини колектора L_k визначається числом та розміром щіток в одному щіткотримачеві, а також поверхнею для його охолодження. У тяговому двигуні число щіткотримачів $g = 2p$ дорівнює числу полюсів.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймаємо густину струму для номінального режиму (8 - 13 А/см²)

$$j_{щ} = 10 \text{ А/см}^2.$$

Контактна поверхня щіткотримача

$$S_{щ} = \frac{I_{ан}}{j_{щ} \cdot p} = \frac{765}{10 \cdot 3} = 25,5 \text{ см}^2.$$

Число колекторних поділок, перекритих щіткою (щіткове перекриття) приймаємо

$$\gamma = 3.$$

Ширина щіток

$$b_{щ} = \gamma \cdot t_{\kappa} = 3 \cdot 5,02 = 15 \text{ мм.}$$

Приймаємо

$$b_{щ} = 16 \text{ мм.}$$

Загальна довжина щіток

$$L_{щ} = \frac{S_{щ}}{b_{щ}} = \frac{25,5}{1,6} = 16 \text{ см.}$$

Приймаємо кількість щіток в щіткотримачі $n_{щ} = 3$. Довжина однієї щітки

$$l_{щ} = \frac{L_{щ}}{n_{щ}} = \frac{16}{3} = 5,33 \text{ см.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймаємо

$$l_{\text{ц}} = 50 \text{ мм.}$$

2. 7 Розрахунок електромеханічних характеристик

Розрахунок виконуємо для ступенів збудження: $\beta_n = 0,98$ і найменшого $\beta_{\min} = 0,326$ (1/3 от β_n). При ізоляції обмоток класів F і H характеристики будують для температури міді $t = 130^\circ\text{C}$.

Приймаємо температурний коефіцієнт

$$t_r = 1,44 .$$

Швидкісні характеристики розраховуємо по універсальній характеристиці. Розрахунковий коефіцієнт насичення у номінальному режимі

$$K'_n = 1,07 \cdot K_n = 1,07 \cdot 2,17 = 2,3 .$$

Користуючись універсальною характеристикою, знаходимо відповідні $K'_n = 2,3$ відносні значення намагнічуючої сили і магнітного потоку:

$$F_{B(o.e.)} = 0,7 \text{ в.о.}$$

$$\Phi_{o.c.} = 0,91 \text{ в.о.}$$

Абсолютне значення цих величин у номінальному режимі:

$$F_B = 10500 \text{ А ;}$$

$$\Phi = 0,117 \text{ Вб.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Встановлюємо масштабі, які пов'язують відносні та абсолютні значення намагнічуючої сили та потоку :

$$m_F = \frac{10500}{0,7} = 15000 \text{ A/}_{в.о.};$$

$$m_\Phi = \frac{0,117}{0,91} = 0,129 \text{ Вб/}_{в.о.}.$$

Задаємо ряд значень струму якоря I_a (охоплюючих весь робочий діапазон) та визначаємо для кожного з них відповідну намагнічуючу силу головних полюсів за формулою

$$F_B = I_a \cdot w_B \cdot \beta_n.$$

За допомогою масштабу m_F знаходимо відповідні значення $F_{B(o.e.)}$. Потім по універсальній характеристиці визначаємо відносне значення потоку $\Phi_{o.e.}$. Після цього за допомогою масштабу потоку m_Φ , отримаємо абсолютну величину потоку Φ .

Частоту обертання знаходимо за формулою

$$n = 1,03 \frac{(U - \Delta U) \cdot 60a}{pN\Phi} = 1,03 \frac{(U - \Delta U) \cdot 60 \cdot}{738 \cdot \Phi} = 0,0837 \cdot \frac{1000 - \Delta U}{\Phi} \text{ (об/хв.)}.$$

Падіння напруги на активних опорах двигуна

$$\Delta U = I_a \sum r + 2 \quad (\text{В}).$$

Загальний опір обмоток двигуна

$$\begin{aligned} \sum r &= (r_a + \beta \cdot r_e + r_d + r_{ко}) \cdot t_r = \\ &= (0,012 + 0,98 \cdot 0,0097 + 0,0029 + 0,009) \cdot 1,44 = 0,048 \text{ Ом} \end{aligned}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість електровоза розраховуємо у вигляді

$$V_{\vartheta} = \frac{D_{\delta} \cdot n}{5,3 \cdot \mu} = \frac{1,2 \cdot n}{5,3 \cdot 3} = 0,0755 \, n \quad \text{км/Г.}$$

Характеристику тягового зусилля розраховуємо за формулою

$$F = \frac{3,6 \cdot U \cdot I_a \cdot \eta}{V_{\vartheta}}.$$

Результати розрахунку характеристик заносимо до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Результати розрахунку характеристик тягового двигуна

I_a , А	F_B , А	$F_{B(60.)}$	$\Phi_{60.}$	Φ , Вб	n , об/хв	V_{ϑ} , км/Г	η_o	F, кН
200	2744	0,183	0,52	0,067	1140	86	0,81	6,76
300	4116	0,274	0,655	0,084	902	68	0,83	13,1
400	5488	0,367	0,74	0,095	794	60	0,86	20,6
500	6860	0,457	0,8	0,103	731	55	0,89	29
600	8232	0,545	0,85	0,109	685	52	0,91	38
700	9604	0,64	0,88	0,113	658	50	0,93	47,1
765	10500	0,699	0,91	0,117	635	48	0,94	54
800	10980	0,73	0,92	0,119	626	47	0,93	56,6
1000	13720	0,914	0,975	0,126	585	44	0,9	73,3

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де P – маса електровоза, т;

i_p – розрахунковий підйом, ‰;

w'_0 – питомий основний опір руху електровоза (тяга), Н/кН;

w''_0 – питомий основний опір руху состава, Н/кН.

Опори руху w'_0 і w''_0 визначаються при розрахунковій швидкості руху $v=v_p$.

Питомий опір руху електровоза в режимі тяги [3]

$$w'_0 = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2, \text{ Н/кН.}$$

Питомий основний опір руху состава [2]

$$w''_0 = \alpha w''_{04} + \beta w''_{06} + \gamma w''_{08}, \text{ Н/кН,}$$

де α , β і γ – виражена в частках одиниці маса відповідно чотирьох, шести та восьмивісних вагонів у составі;

w''_{04} , w''_{06} , w''_{08} – питомий основний опір руху у відповідно чотирьох, шести та восьмивісних вагонів [3]

$$w''_{04} = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_0}, \text{ Н/кН;}$$

$$w''_{06} = 0,7 + \frac{8 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_0}, \text{ Н/кН;}$$

$$w''_{08} = 0,7 + \frac{6 + 0,038v + 0,0021v^2}{q_0}, \text{ Н/кН,}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де v – швидкість руху, км/год;

q_o – маса, яка приходить на одну вісь вагона даного типу, т.

Вихідні данні для розрахунку (відповідно завданню):

$$i_p = 10 \text{ ‰};$$

$$v_p = 42 \text{ км/год.}$$

$$Q = 3000 \text{ т.}$$

$$\alpha = 0,3; \quad q_{o4} = 20 \text{ т.}$$

$$\beta = 0,5; \quad q_{o6} = 15 \text{ т.}$$

$$\gamma = 0,2; \quad q_{o8} = 18 \text{ т.}$$

Попередньо приймаємо електровоз восьмивісним, масу електровоза попередньо приймаємо [3]

$$P = 184 \text{ т.}$$

Розраховуємо основні питомі опори руху:

$$w'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot 42 + 0,0003 \cdot 42^2 = 2,85 \text{ Н/кН};$$

$$w''_{04} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 42 + 0,0025 \cdot 42^2}{20} = 1,28 \text{ Н/кН};$$

$$w''_{06} = 0,7 + \frac{8 + 0,1 \cdot 42 + 0,0025 \cdot 42^2}{15} = 1,75 \text{ Н/кН};$$

$$w''_{08} = 0,7 + \frac{6 + 0,038 \cdot 42 + 0,0021 \cdot 42^2}{18} = 1,33 \text{ Н/кН};$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$w_0''=0,3\cdot1,28+0,5\cdot1,75+0,2\cdot1,33=1,68 \text{ Н/кН}.$$

Сила тяги електровозу в розрахунковому режимі розрахуємо у вигляді

$$F_{кр}=9,8\cdot[4000\cdot(1,68+10)+184\cdot(2,85+10)]=481000 \text{ Н}.$$

Виконаємо перевірку по обмеженню по зчепленню. Коефіцієнт зчеплення для електровозів змінного струму [3]

$$\psi_k=0,28+\frac{4}{50+6v}-0,0006v.$$

$$\psi_k=0,28+\frac{4}{50+6\cdot42}-0,0006\cdot42=0,268.$$

Сила зчеплення при русі з розрахунковою швидкістю, кН [2]

$$F_{сц}=9,81\cdot P\cdot\psi_k;$$

$$F_{сц}=9,81\cdot184\cdot0,268=484 \text{ кН}.$$

Сила зчеплення більш ніж розрахункова сила тяги локомотива. Уточнімо масу локомотива за формулою

$$P=F_{сц}/(9,81\cdot\psi_k);$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P=484/(9,81\cdot 0,268)=184,1\text{т.}$$

Сила тяги одного двигуна в розрахунковому режимі

$$F_{\text{кдр}}=F_{\text{кр}}/8=481000/8=60100\text{ Н.}$$

Потужність одного двигуна в розрахунковому режимі

$$P_p=F_{\text{кр}}\cdot V_p/3,6=60100\cdot 42/3,6=70100\text{ Вт.}$$

Приймаємо номінальну потужність двигуна

$$P_H = 720\text{ кВт.}$$

Номінальна потужність одного двигуна знаходиться в нормальних межах. Остаточно приймаємо кількість осей електровоза – вісім. Маса електровоза остаточно приймаємо

$$P = 184\text{ т.}$$

Швидкість електровоза в номінальному (тривалому) режимі приймаємо по розрахунковій швидкості в відповідності до існуючих рекомендацій [2]

$$V_{\text{ен}} = 48\text{ км/год.}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ВИБОР СТРУКТУРИ СИЛОВОЇ СХЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Принципову схему тягового електроприводу електровозу наведено на рисунку 3.1. На електровозі використано плавне чотирьохзонне фазо-імпульсне регулювання напруги на тягових двигунах. Регулювання потужності на високих швидкостях руху виконується за рахунок послаблення поля тягових двигунів.

В режимі тяги тяговий перетворювач працює як керований випрямляч і живить тягові двигуни послідовного збудження. Для згладжування пульсацій випрямленого струму в коло тягових двигунів включено згладжуючий реактор.

В режимі рекуперації тяговий перетворювач працює як інвертор і отримує живлення від якорів тягових двигунів. Обмотки збудження тягових двигунів підключені до окремого керованого перетворювача, який виконано з нульовим виводом. При високих швидкостях руху задієні всі чотири обмотки тягового трансформатора, а регулювання струму рекуперації забезпечується зміною струму збудження. При низьких швидкостях регулювання струму рекуперації здійснюється за рахунок зміни кількості обмоток трансформатора і регулювання куту відкриття тиристорів інвертора.

Тиристори ВІП відкриваються за допомогою керуючих імпульсів, що виробляються відповідним блоком управління.

На першій зоні регулювання тягові двигуни живляться від випрямних мостів, утворених плечима 3 - 6, підключеними на виводи секції II обмотки трансформатора.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

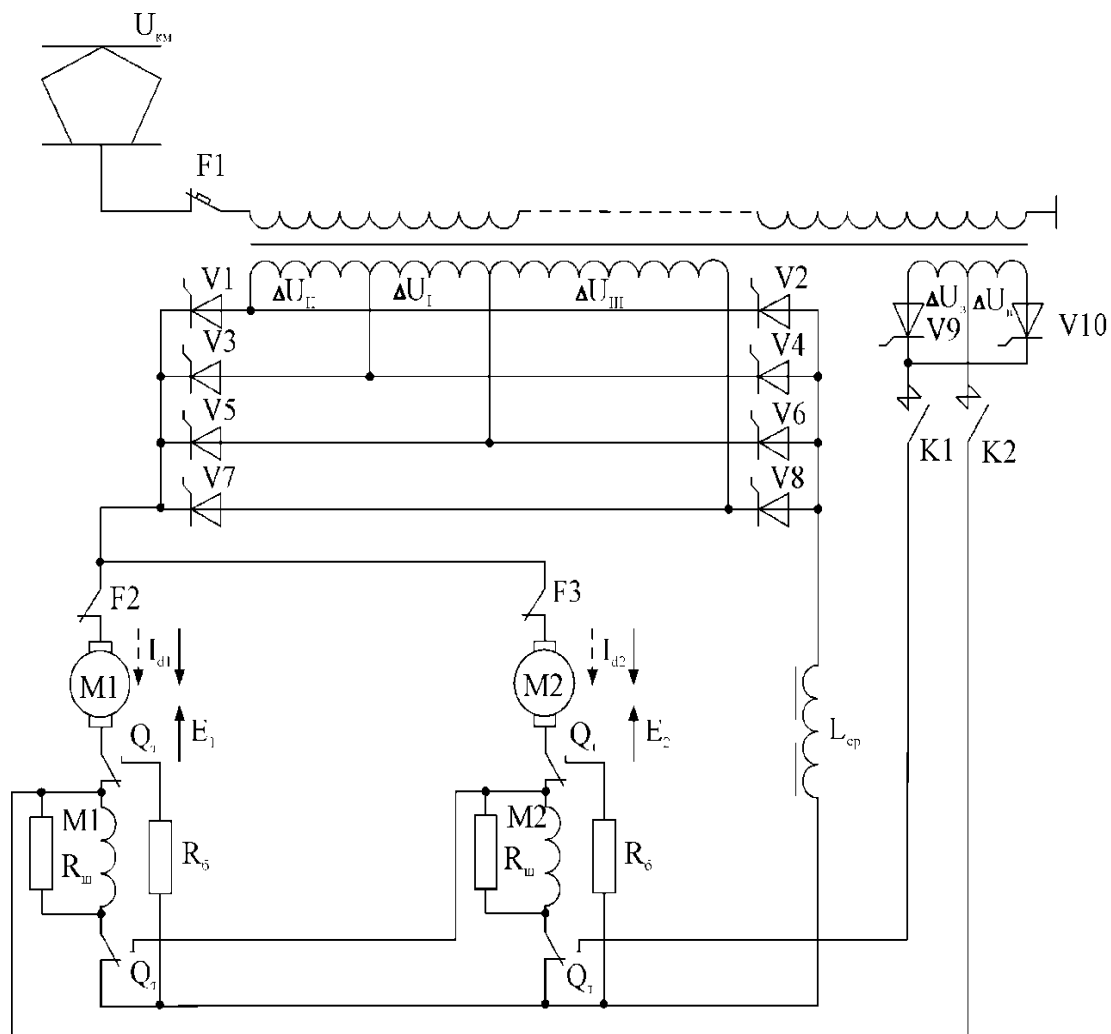


Рисунок 3.1 – Принципова електрична схема тягового електропривода

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тиристори плечей 3, 5 відкриваються імпульсами з постійною фазою α_0 , що відповідає мінімальному куті відкриття, а тиристори плечей 4, 6 - імпульсами з регульованою фазою α_p . Якщо в один з напівперіодів навантаження взяли тиристори плечей 4, 5, то в наступний напівперіод при відкритті тиристорів плеча 3 в момент α_0 відбувається комутація струму з тиристорів плеча 5 на тиристори плеча 3, а енергія ланцюга випрямленого струму розряджається за нульовим контуру: тиристори плечей 4, 3, згладжувач реактор, тяговий двигун. При куті відкриття α_p тиристорів плеча 6 відбувається комутація струму з тиристорів плеча 4 на тиристори плеча 6 і далі струм навантаження проходить через тиристори плечей 3 і 6.

У наступний напівперіод при вугіллі відкриття α_0 тиристорів плеча 5 закриваються тиристори плеча 3 і виникає нульовий контур розряду енергії по ланцюгу: тиристори плечей 6, 5, згладжує реактор. Таким чином, відбувається чергування нульових вентилів для різних полуперіодів напруги мережі, що дозволяє не посилювати по току плечі ВП, що працюють в першій зоні регулювання.

Чим більшу частину полуперіода проходить струм через тиристори, тим більше середнє значення випрямленої напруги на тягових двигунах.

У другій зоні плавним зміною фази відкриття тиристорів плечей 1, 2 здійснюється регулювання випрямленої напруги від $\frac{1}{4}U_{ном}$ до $\frac{1}{2}U_{ном}$. Протікання струму протягом напівперіоду буде відбуватися таким чином, що на початку напівперіоду струм буде проходити від секції II обмотки трансформатора через тиристори плеча 3, ланцюги тягових двигунів, плече 6. У момент відкриття тиристорів плеча 1 відбувається комутація струму з тиристорів плеча 3 на тиристори плеча 1. З цього моменту тягові двигуни живляться від секції I, II обмотки трансформатора. Аналогічно струм буде проходити і в другій напівперіод, але в роботі братимуть участь тиристори плечей 2, 4 і 5.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для подальшого збільшення випрямленої напруги, при повністю відкритих тиристорах плечей 1 і 2, навантаження переводитися з секції I, II на секцію III обмотки трансформатора. Переклад здійснюється без втрати тяги і кидків струму і відбувається наступним чином:

Навантаження з тиристорів плечей 1, 2, 5, 6 переводитися на тиристори плечей 5, 6, 7, 8 без зміни струму якоря. Подальше підвищення напруги здійснюється шляхом подачі імпульсів на відкриття тиристорів плечей 5, 8 і 6, 7 з кутом α_0 і плавним зміною кута відкриття тиристорів плечей 3 і 4 від максимального значення до α_0 . При цьому випрямлена напруга буде плавно змінюватися від $\frac{1}{2}U_{ном}$ до $\frac{3}{4}U_{ном}$ (третя зона)..

Струм по тиристорам зазначених плечей протягом полуперіода буде протікати наступним чином: якщо струм протікає на початку напівперіоду через тиристори плечей 5, 8 (або 6, 7), то з моменту подачі імпульсу на відкриття тиристорів плеча 3 (або 4) відбувається комутація струму з тиристорів плеча 5 (або 6) на тиристори плеча 3 (або 4).

На четвертій зоні регулювання до працюючих тиристорам плечей 3, 8 і 4, 7 додатково підключаються тиристори плечей 1 і 2 з кутом відкриття α_r . Таким чином, до секцій III, II обмотки трансформатора додається секція I.

У момент відкриття тиристорів плечей 1 і 2 з кутом відкриття α_0 випрямлена напруга буде мати найбільше значення. Для зменшення напруги послідовність переходів зворотна.

Вище розглядалося спрощений алгоритм роботи тиристорів перетворювача для режиму тяги. Цей алгоритм дозволяє розглянути основний принцип регулювання випрямленої напруги.

При роботі електровоза в режимі рекуперативного гальмування в зоні високих швидкостей гальмівна сила регулюється плавною зміною струму збудження тягових двигунів, а в зоні середніх і малих швидкостей - плавним зміною напруги ВП, що працюють в інверторному режимі. Зміна струму

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збудження здійснюється за рахунок зміни кута від-криття тиристорів випрямної установки збудження U3.

Тиристиори відкриваються за допомогою керуючих імпульсів, що виробляються системою керування і подаються через вихідні підсилювачі імпульсів випрямної установки збудження на керуючі електрод тиристорів.

Гальмівна сила в четвертій зоні регулюється плавною зміною струму збудження, який у міру зниження швидкості руху електровоза повинен збільшуватися для підтримки заданої гальмівної сили. При досягненні максимального струму збудження подальше підтримання заданої гальмівної

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ВІП В РЕЖИМАХ ТЯГИ ТА РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

4.1. Розрахунок зовнішньої характеристики перетворювача в режимі тяги

Зовнішня характеристика випрямляча розраховується за формулою

$$U_{\partial\partial} = 0,9 \cdot U_{\text{хх}} \cdot \cos \alpha_0 - \frac{2}{\pi} \cdot \lambda \cdot X_m \cdot I_d - \left(\xi \cdot R_n \cdot K_{\text{ef}}^2 + R_d \cdot K_{\text{векф}}^2 \right) \cdot I_d - \Delta U_{\text{е}},$$

де $U_{\text{дв}}$ - напруга на тяговому двигуні, В;

$U_{\text{хх}}$ - номінальна напруга холостого ходу трансформатора на розрахункових позиціях, В;

α_0 - мінімальний кут управління, ел. град.;

λ - коефіцієнт, який враховує втрати напруги за рахунок пульсацій випрямленого струму в індуктивних опорах у міжкомутаційний період;

X_T - індуктивний опір кола струму комутації, Ом;

I_d - випрямлений струм одного перетворювача, А;

ξ - коефіцієнт, який враховує, що у період комутації випрямлений струм протікає, обминаючи кола змінного струму, $\xi = 0,7$;

R_{Π} - активний опір кола змінного струму трансформатора, Ом;

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$K_{\text{еф}}$ - коефіцієнт ефективності змінного струму;

$K_{\text{всф}}$ - коефіцієнт ефективності випрямленого струму;

R_d - активний опір кола випрямленого струму, Ом;

ΔU_B - спад напруги у вентилях випрямляча, В.

Розрахунковий випрямлений струм для однієї перетворювальної установки розраховуємо за формулою

$$I_d = 2I_{\text{дв}},$$

де $I_{\text{дв}}$ – струм одного ТЕД.

Враховуючи, що зовнішня характеристика ВІП прямолінійна, розрахунок виконуємо для двох точок:

- холостий хід випрямляча;
- годинне навантаження.

Індуктивний опір кола струму комутації у припущенні, що потужність контактної мережі нескінченна розраховуємо за формулою

$$X_T = \frac{u_{\text{кз}} \cdot U_{\text{хх}}}{I_N \cdot 100},$$

де $u_{\text{кз}}$ - напруга короткого замикання трансформатора, %;

I_N - номінальний стум трансформатора, А.

Активний опір кола змінного струму розраховуємо за формулою

$$R_{\Pi} = 2 \left[\frac{R_1}{K_T^2} + \frac{R_2}{2} \right],$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де R_1 – опір обмотки мережі трансформатора, Ом;

R_2 – опір тягової обмотки трансформатора на розрахунковій позиції, Ом;

K_T - коефіцієнт трансформації

Коефіцієнт трансформації розраховуємо за формулою

$$K_T = \frac{U_{KM}}{U_{XX}}.$$

Активний опір кола випрямленого струму приймаємо рівним активному опору згладжуючого реактора

$$R_d = R_{cp}.$$

Коефіцієнти λ , K_{ef}^2 і $K_{вef}^2$ визначаємо за величиною пульсації випрямленого струму:

$$\lambda = 1 + 0,2K_{п};$$

$$K_{ef}^2 = (0,88 + 0,18K_{п})^2;$$

$$K_{вef}^2 = 1 + 0,13K_{п}^2,$$

де $K_{п}$ - величина відносної пульсації, яку розраховуємо за формулою

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_n = \sigma \cdot \frac{0.9 \cdot U_{xx}}{\omega \cdot L_d \cdot I_d},$$

де ω – циклічна частота напруги живлення, с^{-1} ;

L_d – індуктивність кола випрямленого струму, мГн, яка дорівнює сумі індуктивностей згладжуючого реактора і двох паралельно ввімкнених тягових двигунів;

σ – коефіцієнт, який залежить від суми μ кута комутації γ та мінімального кута управління α_0 .

Індуктивність кола випрямленого струму розраховуємо за формулою

$$L_d = L_{\text{ср}} + \frac{L_{\text{дв}}}{2},$$

де $L_{\text{дв}}$ - індуктивність обмоток тягового двигуна. У розрахунку враховуємо індуктивність якоря, компенсаційної обмотки, додаткових полюсів. Індуктивність обмотки збудження не враховуємо, тому що вона зашунтована резистором.

Суму μ кута комутації γ та мінімального кута управління α_0 розраховуємо за формулою

$$\mu = (\gamma + \alpha_0) = \arccos \left[\cos \alpha_0 - \frac{\sqrt{2} \cdot I_d \cdot X_T \cdot 1,05}{U_{xx}} \right],$$

де 1,05 – коефіцієнт, який враховує вплив активних опорів кола змінного струму.

Падіння напруги на тиристорах перетворювача розраховуємо за формулою

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta U_{\text{в}} = 2 \cdot U_{\text{ср}} n,$$

де 2 – коефіцієнт, який враховує, що схема випрямлення двопівперіодна;

$U_{\text{ср}} = 0,63 \text{ В}$ - середнє падіння напруги на тиристорі;

n – кількість послідовно ввімкнених тиристорів двох плеч мосту, яку приймаємо в залежності від зони регулювання: $n_1 = 4$; $n_2 = n_3 = 5$; $n_4 = 6$.

Розрахунок ведемо у табличній формі. Результати розрахунку зовнішньої характеристики випрямляча заносимо до таблиці 4.1.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 – Розрахунок зовнішньої характеристики випрямляча

Позначення	Одиниці	Позиція			
		1	2	3	4
U_{XX}	В	308	615	923	1230
U_{dXX}	В	279	558	838	1117
I_d	А	1280	1280	1280	1280
$u_{кз}$	%	6,4	7,1	6,5	8,5
X_T	Ом	0,0112	0,0248	0,0341	0,0594
	ел. град.	27,2	28,3	27,3	30,8
	-	0,77	0,78	0,79	0,8
L_d	мГн	3,44	3,44	3,44	3,44
$K_{по}$	-	0,108	0,227	0,331	0,483
λ	-	1,022	1,045	1,066	1,097
ΔU_X	В	12,77	29,37	42,12	77,30
K_T	-	79,4	39,7	26,5	19,8
$R_{п}$	Ом	0,002	0,003	0,0065	0,01
$K^2_{еф}$	-	0,81	0,85	0,88	0,93
$K^2_{веф}$	-	1,00	1,01	1,01	1,03
ΔU_R	В	15	17	22	28
ΔU_B	В	5,04	6,3	6,3	7,56
$U_{дв}$	В	247	505	768	1004

Зовнішню характеристика ВІП в режимі тяги приведено на рисунку 4.1.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2. Розрахунок зовнішньої характеристики перетворювача в режимі рекуперативного гальмування

Зовнішню характеристику інвертора розраховуємо за формулою

$$U_{дв} = 0.9 \cdot U_{xx} \cdot \cos \delta_0 - \frac{2}{\pi} \cdot \lambda \cdot X_T \cdot I_d + \left(\xi \cdot R_n \cdot K_{эф}^2 + R_d \cdot K_{вэф}^2 \right) \cdot I_d + \Delta U_B,$$

де δ_0 - кут запасу інвертора.

Всі величини, які входять до виразу, крім R_d , визначаємо за тими формулами, що і при розрахунку зовнішньої характеристики випрямляча.

Активний опір кола постійного струму при рекуперації розраховуємо за формулою

$$R_d = R_{cp} = \frac{R_\delta}{2},$$

де R_δ - величина опору баластного резистора у колі одного ТЕД.

Коефіцієнт σ визначаємо для режиму рекуперації в залежності від суми μ' кута комутації γ і кута запасу інвертора δ_0

$$\mu' = \gamma + \delta_0 = \arccos \left[\cos \delta_0 - \frac{\sqrt{2} \cdot I_d \cdot X_T \cdot 1.05}{U_{xx}} \right].$$

Розрахунок ведемо у табличній формі. Результати розрахунку зовнішньої характеристики інвертора заносимо до таблиці 4.2.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 - Розрахунок зовнішньої характеристики інвертора

Позначення	Одиниці	Позиція			
		1	2	3	4
U_{XX}	В	308	615	923	1230
U_{dXX}	В	265	529	794	1059
I_d	А	1280	1280	1280	1280
$u_{kз}$	%	6,4	7,1	6,5	8,5
X_T	Ом	0,0112	0,0248	0,0341	0,0594
	ел. град.	30,5	31	32,5	36
	-	0,75	0,76	0,79	0,92
L_d	мГн	3	3	3	3
$K_{по}$	-	0,123	0,260	0,380	0,553
λ	-	1,025	1,052	1,076	1,111
ΔU_x	В	5,1	14,0	38,8	84,6
K_T	-	79,4	39,7	26,5	19,8
$R_{п}$	Ом	0,002	0,003	0,0065	0,01
$K^2_{еф}$	-	0,81	0,86	0,90	0,96
$K^2_{в\text{еф}}$	-	1,00	1,01	1,02	1,04
ΔU_R	В	147	151	157	166
ΔU_B	В	5,04	6,3	6,3	7,56
$U_{дв}$	В	412	673	919	1148

Зовнішню характеристика ВІП в режимі рекуперації приведено на рисунку 4.2.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1 Аналіз досвіду експлуатації вантажних електровозів на залізницях України показав, що в якості тягового двигуна в електроприводах електровозів змінного струму може ефективно використовуватися електричний двигун пульсуючого струму з високим значення коефіцієнта корисної дії.

2 Тип та номінальні дані тягового електроприводу електровозу змінного струму визначаються специфікою експлуатації електрорухомого складу на даній ділянці залізниці, а саме: середньою масою поїздів, розрахунковим уклоном та швидкістю руху на розрахунковому підйомі.

3 При використанні на електровозах змінного струму колекторного електроприводу найбільш ефективним способом плавного регулювання напруги на тягових двигунах в режимах тяги та рекуперативного гальмування є зонне фазо-імпульсне регулювання напруги.

4 Найбільш високий економічний ефект від використання плавного регулювання напруги на тягових двигунах може бути досягнений при використанні системи автоматичного керування пуском та гальмуванням електровозу.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Проектирование тяговых электрических машин/ под ред. М.Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.

2 Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

3 Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. – 287с.

4 Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. М.: Транспорт. 1987. – 536 с.

5 ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. -50с.

6 Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А., Горчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.

7 Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Тягові електричні машини”. А.М.Афанасов, В.Є.Васильєв, 1999, – 32 с.

8 Б.Н. Тихменев, В.А.Кучумов. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. 1988. – 308 с

9 Режимы работы магистральных электровозов / Некрасов О. А., Лисицин А.Л., Мугинштейн Л. А., Рахманинов В. И. / Под ред. Некрасова О. А. – М.: Транспорт, 1983. – 231 с.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		