

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО – ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТУ
Кафедра «Тяговий рухомий склад залізниць»

Ю. Ф. Дубравін

**„СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОРУХОМИМ СКЛАДОМ”
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання контрольної роботи
для студентів спеціальності 7.05070203
«Електричний транспорт»
усіх форм навчання**

Київ 2016

УДК 621.337.1

Дубравін Ю. Ф.

Системи керування електрорухомим складом. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи.–К.: ДЕТУТ, 2016. – 22 с.

У методичних вказівках розглянуто порядок розрахунку системи керування електрорухомим складом. Розглянуто питання розрахунку системи зонно-фазового регулювання напруги на тягових двигунах електровоза однофазно-постійного струму з тяговими двигунами послідовного збудження та розрахунку характеристик керованих перетворювачів в режимі тяги та рекуперативного гальмування.

Методичні вказівки до виконання контрольної роботи розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» (протокол № від .2015 р.) та на засіданні методичної комісії факультету ІРСЗ університету (протокол № від 2015 р.).

Призначені для студентів університету спеціальності 7.05070203 «Електричний транспорт» усіх форм навчання та відповідає робочій програмі курсу «Системи керування електрорухомим складом».

Укладач: доц., канд. техн. наук **Ю. Ф. Дубравін**

Рецензенти: зав. кафедри ТРСЗ, канд. техн. наук **Ю. В. Черняк;**
начальник локомотивного депо Київ-Пасажирський, к.т.н.
Батюшин І.Є.

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Робота випрямно-інверторного перетворювача (ВІП) в тяговому режимі електровоза	6
2. Напруга і струм при фазовому регулюванні	8
3. Розрахунок зовнішньої характеристики ВІП в режимі тяги	9
4. Розрахунок випрямної установки	11
5. Розрахунок швидкісних характеристик	12
6. Регулювання гальмівної сили в режимі рекуперативного гальмування	15
7. Розрахунок зовнішньої характеристики ВІП в режимі рекуперативного гальмування	16
8. Розрахунок характеристик струму ТЕД і гальмівних характеристик електровоза при рекуперативному гальмуванні	17
9. Гальмівні характеристики електровоза при рекуперативному гальмуванні.	18
10. Розрахунок обмеження по зчепленню.	19
11. Обмеження гальмівного струму по комутації	19
Література	21

Вступ

В контрольній роботі виконується розрахунок системи зонно-фазового регулювання напруги на тягових двигунах електровоза однофазно-постійного струму з тяговими двигунами послідовного збудження. Метою роботи є поглиблення теоретичних знань по системах управління електрорухомого складу з фазним регулюванням напруги на тягових двигунах і розвиток навичок розрахунку характеристик керованих симетричних випрямлячів та неавтономних інверторів

В даний час на електрорухомому складі існує два основних способи регулювання напруги, що підводиться до тягових двигунів: за рахунок зміни моменту відкриття вентилів випрямляча (електровози ВЛ80 р, ВЛ85, ЭП1, 2ЭС5К, 2ЕЛ5), а також шляхом ступінчастої зміни напруги, що подається із вторинної обмотки трансформатора (ВЛ80с, ВЛ80т). Більш прогресивним є перший спосіб регулювання напруги на тягових двигунах, який і розглядається у контрольній роботі.

Тема контрольної роботи актуальна також у зв'язку з тим, що в даний час інвентарний парк електровозів змінного струму поновлюється шляхом введення в експлуатацію локомотивів з плавним регулюванням напруги, які повинні з часом замінити електровози зі ступінчастим регулюванням напруги.

Системи управління з керованими перетворювачами та плавним регулюванням напруги мають низку переваг та недоліків порівняно із системами, в яких використовуються некеровані перетворювачі і ступінчасте регулювання напруги. Недоліки системи пов'язані зі зниженням коефіцієнта потужності електровоза при значних кутах фази регулювання. Для зменшення негативного впливу на рівень коефіцієнта потужності використовують системи зонно-фазового регулювання напруги на тягових двигунах. Вони дають змогу покращити тягово-експлуатаційні характеристики електрорухомого складу, сприяють економії електроенергії на тягу поїздів та створюють умови для створення автоматизованих систем управління електрорухомого складу.

В даній контрольній роботі розглянуто принцип роботи систем зонно-фазового регулювання напруги на тягових двигунах та загальні дані для розрахунку випрямного інверторного перетворювача і характеру зміни основних параметрів в процесі регулювання режимів роботи тягових двигунів електровоза.

Вихідні дані

Таблиця 1. Загальні дані для розрахунку

Позначення	Параметр	Значення	Од.вим.
P	Вага електровоза	-	кН
m	Кількість осей	8	-
	Тип ТЕД	-	-
L_{3P}	Індуктивність згладжуючого реактора	8	мГн
R_{3P}	Активний опір згладжуючого реактора	0,008	Ом
R_{δ}	Опір баластного резистора	0,17	Ом
δ_0	Кут запасу при інвертуванні струму рекуперації	20	ел.град
U_{KH}	Напруга контактної мережі	25	кВ
f	Частота напруги контактної мережі	50	Гц
α_0	Мінімальний кут управління ВПП	10	ел.град
$U_{ДВ.Н}$	Напруга на колекторі	-	В
$I_{Г}$	Годинний струм	-	А
$R_{Я}$	Опір якірної обмотки ТЕД	-	Ом
$R_{ГП}$	Опір головних полюсів ТЕД	0,096	Ом
$R_{ДП} + R_{КО}$	Опір додаткових полюсів і компенсаційної обмотки ТЕД	0,018	Ом
$L_{ДВ}$	Індуктивність обмоток ТЕД	0,57	мГн
β_H	Номінальний коефіцієнт послаблення збудження	0,96	-
β_1	Коефіцієнт послаблення збудження першого ступеня	0,7	-

Таблиця 2. Параметри тягового трансформатора

Позиція (зона регулювання)	1	2	3	4
Ступені трансформатора	a1-1	1-2	2-x ₁	a ₁ - x ₁
Напруга холостого ходу $U_{ХХ}$, В	-	-	-	-
Напруга короткого замикання $u_{кз}$, %	-	-	-	-
Номінальний струм I_H , А	-	-	-	-
Опір обмотки мережі при 75°C, Ом	0,31	0,31	0,31	0,31
Опір тягових обмоток при 75°C, Ом	0,00220	0,00449	0,00530	0,0076

1. Робота випрямно-інверторного перетворювача (ВІП) в тяговому режимі електровоза

Випрямно-інверторні перетворювачі сучасних вантажних електровозів забезпечують чотиризонне регулювання напруги на тягових двигунах (ТЕД). Вторинна обмотка кожного плеча тягового трансформатора (ТТ), при цьому, складається із трьох секцій, з відношенням напруг 1:1:2, дві обмотки мають напругу по U_2 , третя – $2U_2$. У режимі тяги ВІП працює як керований випрямляч, що дозволяє регулювати напругу на ТЕД від нуля до номінального значення.

У режимі тяги для відкриття тиристорів плечей ВІП блок керування БУВІП у кожен напівперіод виробляє імпульси регульовані по фазі a_p і нульові a_0 . Імпульси a_0 подаються на початку напівперіода з фазою $8-10^\circ$.

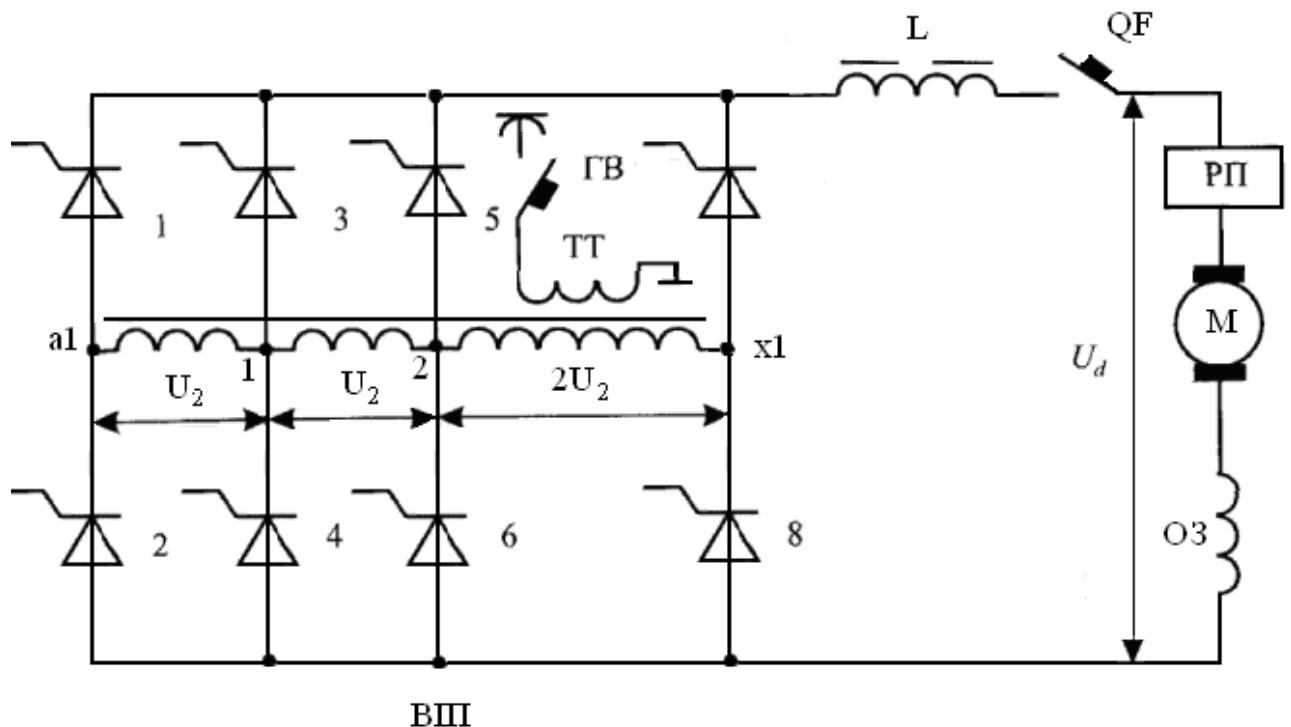


Рис.1. Схема безконтактного зонно-фазового регулювання напруги на ТЕД

Відлік фази імпульсів починають від моменту рівності нулю напруги U_2 вторинної обмотки тягового трансформатора. Завдяки подачі на окремі тиристири ВІП керуючих імпульсів з постійною фазою a_0 , що відповідає мінімальному куту відкриття, створюються нульові контури розрядки енергії кола випрямленого струму.

Фаза імпульсів a_p може змінюватись в межах на $170^\circ(a_{p \max}) - 9^\circ(a_{p \min})$. На I зоні регулювання створюються умови для подачі імпульсів керування на тиристири плечей 3,4,5,6. Міст при цьому працює як міст з поперечним розташуванням тиристорів. При цьому протягом одного напівперіода напруги U_2 на плече 4 подаються імпульси $a_{p \max}$, на плече 5 імпульси a_0 і $a_{p \max}$. В наступному напівперіоді на плече 3 подаються імпульси a_0 , на

плече 6 – імпульси $a_p \text{max}$. Одночасна подача імпульсів $a_p \text{max}$ на плече 4 і 5 призводить до відкривання цих плечей, що спричиняє протікання струму через ТЕД. Після зміни полярності напруги трансформатора відкриваються тиристри плеча 3, закриваються тиристри плеча 5. Це спричиняє створення нульового контура, в якому коло струму ТЕД замикається через плече 3 і 4. В цьому ж напівперіоді відбувається комутація – відкриваються тиристри плеча 6, а тиристри плеча 4 закриваються. В результаті створюється контур через плечі 3 і 6. Після чергової зміни полярності напруги відкриваються тиристри плеча 5 і закриваються в плечі 3. Це призводить до створення другого нульового контура, в якому коло струму ТЕД замикається через плече 5 і 6. Далі процес протікання струму в I зоні регулювання повторюється.

В II–IV зонах схема працює як міст з поздовжнім розташуванням тиристорів.

При цьому комутація в кожному напівперіод відбувається тричі. У момент часу $\omega t = a_0$ відбувається комутація по великому контуру (ВК)

Тяговий двигун при цьому замкнутий накоротко через два відкритих тиристора. Приблизно через 350 мкс відбувається комутація по малому контуру (МК)

При $\omega t = a_p$ починається фазова комутація (КФ), після якої відбувається перехід від випрямлення меншої напруги (ВМ) до випрямлення більшої напруги (ВБ). Тиристри отримують імпульси управління при $\omega t = a_0 = 9^\circ$, $\omega t = a_{03} \cong 20^\circ$, і $\omega t = a_p$, величина a_p - регулюється в межах від 170° до 20° автоматизованою системою управління (АСУ). При $\omega t < a_0$ струм через тиристри зберігає напрямок попереднього напівперіода, хоча при $\omega t = 0$ ЕРС вторинної обмотки трансформатора змінює свій знак.

Загальний алгоритм роботи мостів в зонах 1 – 4 такий:

1. При $\omega t = a_0$ відмикається черговий тиристор анодної або катодного групи і починається комутація по великому контуру. При $\omega t = a_0 + \gamma_0$ комутація закінчується.

За час γ_0 ТЕД і вторинна обмотка трансформатора закорочені. При $a_0 + \gamma_0 < \omega t < a_{03}$ струм протікає через ТЕД по буферному контуру.

Трансформатор при цьому працює в режимі холостого ходу.

2. При $\omega t = a_{03}$ відкривається тиристор і починається комутація по малому контуру. Протягом цього часу вторинна обмотка трансформатора закорочена. При $\omega t = a_{03} + \gamma'_0$ тиристор, що відпрацював, закривається і комутація закінчується.

3. При $a_{03} + \gamma'_0 < \omega t < a_p$ ТЕД отримує живлення від секції трансформатора з меншою напругою.

4. При $\omega t = a_p$ відкривається черговий тиристор і починається фазова комутація. При $\omega t = a_p + \gamma_\phi$ комутація закінчується.

При $a_p + \gamma_\phi < \omega t < \pi + a_p$ ТЕД отримує живлення від двох секцій трансформатора через тиристори.

2. Напруга і струм при фазовому регулюванні

Миттєве значення напруги на вторинній обмотці трансформатора:

$$u_2 = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \quad (1)$$

Середнє значення випрямленої напруги в режимі неробочого ходу в межах зон залежності від кута фазового регулювання α визначається з формул:

$$\text{I зона} - U_{da1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \cdot (1 + \cos(\alpha)) \quad (2)$$

$$\text{II зона} - U_{da2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \cdot (3 + \cos(\alpha)) \quad (3)$$

$$\text{III зона} - U_{da3} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \cdot (5 + \cos(\alpha)) \quad (4)$$

$$\text{IV зона} - U_{da4} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \cdot (7 + \cos(\alpha)), \quad (5)$$

де U_2 – діюче значення напруги однієї секції вторинної обмотки трансформатора;

α – кут фазового регулювання тиристорів α_p .

Комутаційні процеси приводять до збільшення фазового зсуву між струмом і напругою, що знижує коефіцієнт потужності випрямляча.

Коефіцієнт потужності для відповідної зони регулювання напруги

$$\chi_i = v_0 \cdot \frac{U_{dai}}{U_{doi}} \quad (6)$$

де i – номер зони регулювання напруги;

$U_{doi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2i}$ – середнє значення випрямленої напруги в режимі неробочого ходу i – ої зони регулювання при $\alpha = 0$;

$v_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9$ – коефіцієнт викривлення струму

Тривалість комутації при фазовому регулюванні.

Комутація напівпровідникових пристроїв при зонно-фазовому регулюванні відбувається при кутах $\omega t = a_0$, $\omega t = a_{03}$, $\omega t = a_p$

Тривалість комутації визначається по формулі:

$$\gamma = \arccos \left(\cos(\alpha) - \frac{2 \cdot I_d \cdot x_2}{\sqrt{2} \cdot U_2} \right) - \alpha \quad (7)$$

де I_d – середній випрямлений струм ВПП $I_d = 2 \cdot I_{дв}$; (8)

$I_{дв}$ – струм одного ТЕД;

x_2 – індуктивний опір кола струму комутації, Ом.

Індуктивний опір кола струму комутації у припущенні, що потужність контактної мережі нескінченна:

$$X_2 = \frac{(U_{кз} \cdot U_{хх})}{(I_H \cdot 100)} \quad (9)$$

де I_H – номінальний струм трансформатора, А;

$U_{кз}$, – напруга короткого замикання трансформатора, % ;

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

За період комутації γ струм комутації змінюється від I_d до $-I_d$. Миттєве значення струму комутації в тяговій обмотці трансформатора

$$I_{k2}(t) = \frac{U_{2m}}{X_2} \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\omega t + \alpha)) - I_d, \quad (10)$$

де $0 \leq t \leq t_k$ тривалість комутації, с.

Тривалість комутації $t_k = \gamma/\omega$,

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота змінного струму, 1/с;

$f = \frac{1}{T}$ – частота змінного струму, Гц.

3. Розрахунок зовнішньої характеристики ВІП в режимі тяги

Зовнішня характеристика перетворювача, тобто залежність напруги, підведеної до ТЕД від їх навантаження:

$$U_d = U_{d\alpha} - \Delta U_{\Sigma}, \quad (11)$$

де $U_{d\alpha} = U_{d0} \frac{1+\cos(\alpha)}{2}$ – середня випрямлена напруга неробочого ходу симетричного моста з буферним контуром, В;

$U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2$ – середня випрямлена напруга неробочого ходу при $\alpha=0$, В;

ΔU_{Σ} – сумарні втрати та падіння напруги в колі ТЕД, В.

Сумарні втрати та падіння напруги, В

$$\Delta U_{\Sigma} = \Delta U_k + \Delta U_r + \Delta U_{\epsilon} + \Delta U_{zp}, \quad (12)$$

Де $\Delta U_k = \frac{2I_d X_a \lambda}{\pi}$ – втрати випрямленої напруги за період комутації вентилів, В;

$\lambda = 1 + 0,4 \cdot K_{ni}$ – коефіцієнт, який враховує втрати напруги за рахунок пульсації випрямленого струму в індуктивних опорах у міжкомутаційний період;

ΔU_r – падіння напруги в приведеному активному опорі обмоток трансформатора, В;

ΔU_{zp} – падіння напруги в згладжуючому реакторі, В;

ΔU_{ϵ} – падіння напруги у вентилях ВІП, В.

Коефіцієнт пульсації випрямленого струму

$$K_{ni} = \frac{0,67 \cdot U_{doi}}{2\omega L_d I_d}, \quad (13)$$

де U_{doi} – середня випрямлена напруга неробочого ходу при $\alpha = 0$ для i -ої зони регулювання;

$$L_d = L_{зр} + \frac{L_{дв}}{2} \quad - \quad \text{індуктивність кола випрямленого струму, Гн};$$

$L_{зр}, L_{дв}$ – відповідно індуктивність згладжуючого реактора і ТЕД.

Під час комутації вентилів відбувається короточасне коротке замикання вторинної обмотки ТТ, а випрямлений струм замикається в обхід вторинної обмотки. При цьому падіння випрямленої напруги в активному опорі трансформатора буде меншим у порівнянні з тим же падінням у випадку миттєвої комутації ($\gamma=0$), коли б струм в обмотці ТТ і навантажені були однакові.

Середнє значення падіння напруги в обмотках ТТ в міжкомутаційному інтервалі $\gamma \dots \pi$, В

$$\Delta U_r = \frac{1}{\pi} K_{эфз} \int_{\gamma}^{\pi} R_T I_d d\omega t = \left(1 - \frac{\gamma}{\pi}\right) R_T I_d K_{эф}, \quad (14)$$

де $K_{эф} = 0,88 + 0,18 \cdot K_{ПВ}$ – коефіцієнт ефективності змінного струму вторинної обмотки ТТ;

$K_{ПВ} = \frac{0,67 \cdot U_{doi}}{I_d \cdot \omega \cdot L_d}$ – коефіцієнт відносної пульсації струму для i -ої зони регулювання;

R_T – активний опір обмоток трансформатора, приведений до вторинної обмотки, Ом

$$R_T = R_2 + \frac{R_1}{K_T^2},$$

де: R_1 – опір первинної бмотки трансформатора, Ом;

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

K_T – коефіцієнт трансформації трансформатора

$$K_T = \frac{U_{KM}}{U_{XX}} \quad (15)$$

Падіння напруги в згладжуючому реакторі

$$\Delta U_{зр} = R_d I_d \cdot K_{деф}, \quad (16)$$

де R_d – активний опір обмотки згладжуючого реактора, Ом;

$K_{деф} = \sqrt{1 + 0,13 K_{ПВ}^2}$ – коефіцієнт ефективності випрямленого струму, що враховує збільшення падіння напруги в активному опорі в зв'язку з пульсацією випрямленого струму.

Падіння випрямленої напруги в активному опорі ТТ та в згладжуючому реакторі:

$$\Delta U_R = \Delta U_r + \Delta U_{зр} = \left[\left(1 - \frac{\gamma}{\pi}\right) R_T K_{эф} + R_d K_{деф} \right] I_d. \quad (17)$$

Падіння напруги у вентилях ВІП:

$$\Delta U_B = 2 \cdot U_{ср} \cdot n \quad (18)$$

де $\Delta U_B = 2 \cdot U_{ср} \cdot n$ – середнє значення падіння напруги на тиристорі;

n – кількість послідовно ввімкнених тиристорів двох плеч мосту, яка залежить від зони регулювання: $n_1 = 4, n_2 = n_3 = 5, n_4 = 6$.

Результати розрахунку зовнішньої характеристики випрямляча заносимо до таблиці 3.

Таблиця 3. Зведена таблиця величин ВІП в режимі тяги

Позначення	Одиниці виміру	Зона регулювання			
		1	2	3	4
U_2	В				
I_d	А				
$U_{кз}$	%				
x_2	Ом				
χ при α_p					
u при α_p	градус				
L_D	мГн				
$K_{ПВ}$	-				
K_T	-				
R_T	Ом				
$K_{e\phi}$	-				
$K_{de\phi}$	-				
U_{d_a}	В				
ΔU_k	В				
ΔU_R	В				
ΔU_B	В				
U_d	В				

По результатах розрахунків побудувати зовнішню характеристику ВІП в режимі тяги для зон регулювання напруги.

4. Розрахунок випрямної установки

Випрямний міст збирається із великої кількості вентилів, які з'єднуються послідовно і паралельно в кожному плечі мосту.

Число послідовно включених вентилів розраховується по найбільшому значенню повторюваного зворотної напруги (прилеглого до вентилів в непровідному напрямку).

В плечі мосту найбільше значення повторювальної напруги U_m (тобто напруга, яка з'являється на вентилях кожний період) визначають як максимальне значення напруги при найбільш допустимих напругах в контактній мережі з урахуванням збільшеної напруги при холостому ході перетворювальної установки за формулою

$$U_m = \sqrt{2} \cdot (1.11 \cdot U_{дн} \cdot K_1 \cdot K_2) \quad (19)$$

де $K_1=1,125$, коефіцієнт, що враховує підвищення напруги ВПП при зниженні навантаження;

$K_2=1,16$ - коефіцієнт, що враховує можливе підвищення напруги в контактній мережі до 29 кВ (на 16%);

$U_{дн}$ – номінальна пруга на тягових машинах, В.

Кількість послідовно включених вентилів m_v визначається з урахуванням отримання на вентилях напруги не більше номінального при виході одного вентиля із ланцюга послідовно включених вентилів:

$$m_g = 2,03 \frac{U_{дн}+1}{U_{взв}} \quad (20)$$

де $U_{взв}$ – повторювальна напруга вентиля, яка залежить від класу вентиля.

Отримане значення m_g округлюють до найближчого більшого цілого числа.

Число паралельно включених ланцюгів вентилів в кожному плечі визначають по величині випрямленого струму I_g моста, який розраховують за формулою

$$I_g = a_d I_d, \quad (21)$$

де I_d – розрахунковий струм ТЕД;

a_d – число паралельних гілок ТЕД.

При двопівперіодному випрямлені струм проходить послідовно по вентилях різних плечей. Звідси, середній струм, який проходить через вентиля одного плеча,

$$I_{cp} = \frac{I_g}{2} \quad (22)$$

Число паралельно включених віток вентилів в плечі b знаходять за формулою

$$b = \frac{a_d \cdot I_p}{2 \cdot I_{НВ} \cdot K_3 \cdot K_4} \quad (23)$$

де $I_{НВ}$ – номінальний струм вентиля;

$K_3=0.85$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу струму між паралельними гілками в плечі моста;

$K_4= 0.9$ – коефіцієнт, що враховує підігрів повітря при проходженні його через випрямну установку, в результаті чого останні вентиля охолоджуються підігрітим повітрям.

Кількість вентилів округляють до найближчого більшого цілого числа.

По результатах розрахунку необхідно привести схему плеча моста.

5. Розрахунок швидкісних характеристик

Розрахунок і побудова швидкісної і електротягової характеристик ТЕД при номінальній нарузі та при повному і ослабленому збудженні виконується за допомогою універсальної характеристики, заданої у відносних одиницях.

Перерахунок координат точок швидкісних і електротягових характеристик виконується по формулах:

$$I = \left(\frac{I}{I_H}\right) I_H; \quad v = \left(\frac{v}{v_H}\right) v_H; \quad F_{кд} = \left(\frac{F_{кд}}{F_{кдн}}\right) F_{кдн}.$$

Струм (в А) і сила тяги (в кН) номінального режиму розраховується виходячи із заданих значень v_H , U_H і номінальної потужності ТЕД P_H .

$$I_H = \frac{P_H \cdot 1000}{U_{дв} \eta_H}, F_{кдн} = \frac{3.6 P_H}{\eta_H} \eta_{зп} \quad (24)$$

де $\eta_H = 0,915$ – ККД тягового двигуна;

$\eta_{зп} = 0.97$ – ККД зубчастої передачі.

Залежність питомої е.р.с. від струму збудження I_3 може бути знайдена з швидкісної характеристики ТЕД для номінальної напруги U_H при $\beta = \beta_H$ за формулою:

$$C_v \Phi = \frac{U_{двн} - R_{дв} \cdot I_d}{v} \quad (25)$$

де $C_v \Phi$ – магнітний потік ТЕД, помножений на його конструктивну постійну, віднесена до обода колеса;

$R_{дв}$ – активний опір обмоток ТЕД при температурі 110° С

$$R_{дв} = R_a + \beta_H \cdot R_{ГП} + R_{ДП} + R_{КО} \quad (26)$$

де $R_a, R_{ГП}, R_{ДП}, R_{КО}$ – опори якоря, головних полюсів, допоміжних полюсів та компенсаційної обмотки відповідно;

β_H – коефіцієнт ослаблення поля ТЕД.

Співвідношення між струмом якоря ТЕД і струмом збудження

$$I_3 = \beta_H I_d \quad (27)$$

Розрахунок питомої е.р.с. виконують для струму збудження 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 А. Результати розрахунку зводяться до таблиці 4.

Таблиця 4 – Залежність питомої е.р.с. від струму збудження.

I_3, A	300	400	500	600	700	800	900
$v, \text{км/г}$							
$C_v \Phi, \text{В} \cdot \text{г/км}$							

По результатах виконаних розрахунків будують графік $C_v \Phi(I_3)$.

До ТЕД прикладена випрямлена напруга U_d з виходу ВП. Значення цієї напруги змінюється залежно від струму навантаження та впливає на швидкість руху.

Залежності швидкості руху електровоза від струму навантаження

$$v(I_d) = \frac{U_d - I_d R_{дв}}{C_v \Phi} \quad (28)$$

В роботі необхідно виконати перерахунок швидкісних характеристик ТЕД для кожної із зон регулювання напруги ВП для двох значень коефіцієнта ослаблення поля: номінального β_H та першого ступеня ослаблення β_1 .

Результати розрахунку зводяться до таблиці 5.

Таблиця 5. Перераховані характеристики ТЕД при живленні від ВП.

$I_{ДВ}, А$								
$V_H, км/г$	ПП							
	ОП							
I зона	$U_{ДВ}, В$							
	$v, км/г$	ПП						
		ОП						
II зона	$U_{ДВ}, В$							
	$v, км/г$	ПП						
		ОП						
III зона	$U_{ДВ}, В$							
	$v, км/г$	ПП						
		ОП						
IV зона	$U_{ДВ}, В$							
	$v, км/г$	ПП						
		ОП						

Максимальна сила зчеплення коліс з рейкою визначається за формулою:

$$F_{зч} = P_0 \cdot \psi_k \quad (29)$$

де P_0 – навантаження на вісь електровоза, Н;

$$P_0 = \frac{P}{m} \quad (30)$$

ψ_k – розрахунковий коефіцієнт зчеплення:

$$\psi_k = 0.294 + \frac{4.2}{50+6 \cdot v} - 0.00063 \cdot v \quad (31)$$

Значення швидкості задаються в діапазоні від 0 до 100.

Результати розрахунку заносяться до таблиці 6.

Максимально допустимий струм ТЕД за умови зчеплення визначається по характеристикам тяги $F_{кд} = f(I)$ з умови $F_{кд} = F_{зч}$.

Обмеження струму по зчепленню розраховується для номінального та ослабленого (ОП1) поля і наноситься на швидкісні характеристики ТЕД.

Результати розрахунку зводяться до табл. 6.

Таблиця 6. Обмеження струму по зчепленню

v , км/г	0	10	20	30	45	55	75
ψ_K							
F_{KD} кН							
I_{max} , А	НП						
	ОП						

По результатах виконаних розрахунків будують графіки $v(I)$ для кожної із зон з нанесенням на них обмежень по струму

6. Регулювання гальмівної сили в режимі рекуперативного гальмування

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 – плавною зміною напруга ВПП, що працюють в інверторному режимі. Зміна струму збудження здійснюється за рахунок зміни кута відкриття тиристорів випрямної установки збудження.

Тиристиори відкриваються за допомогою керівних імпульсів, що виробляються БУВПП.

Гальмівна сила в четвертій зоні регулюється плавною зміною струму збудження, який у міру зниження швидкості руху електровоза повинен збільшуватися для підтримки заданої гальмівної сили. Після досягнення максимального струму збудження подальша підтримка заданої гальмівної сили здійснюється плавним зменшенням напруги ВПП.

Плавне регулювання напруги ВПП проводиться з середини четвертої зони ($\alpha p = 90$ ел.г) до першої зони. У четвертій зоні тиристиори плечей 1, 2, 7, 8 відкриваються з кутом випередження β . Імпульси управління формуються системою авторегулювання інвертора, що забезпечує постійність кута запасу $\delta = \beta - \gamma$ при струмі якоря більше 400А. При менших струмах здійснюється регулювання інвертора з постійним кутом випередження β .

Регулювання в четвертій зоні здійснюється зміною фази відкриття тиристорів плечей 3 і 4, починаючи з кута $\alpha=90$ ел.г.

Струм двигунів на початку напівперіоду протікає через тиристиори плечей 1, 8 (чи 2, 7). У момент подачі керівних імпульсів на тиристиори плечей 3 (чи 4) відбувається комутація струму з тиристорів плечей 1 (чи 2) на тиристиори плечей 3 (чи 4). Надалі струм до кінця напівперіоду протікатиме через тиристиори плечей 3, 8 або 4, 7.

Перехід на регулювання в третій зоні здійснюється подачею імпульсів з кутом випередження β на тиристори плечей 3, 8 і 4, 7 і закриттям тиристорів плечей 1, 2. Регулювання здійснюється зміною фази відкриття тиристорів плечей 5, 6. Після закінчення регулювання в третій зоні виконується синхронне перемикавання навантаження з тиристорів плечей 5, 6, 7, 8 на тиристори плечей 1, 2, 5, 6. Останні відкриваються з кутом випередження β , забезпечуючи перехід в другу зону регулювання.

У другій зоні зміною фази відкриття тиристорів плечей 3, 4 проводять подальше зменшення напруги ВП.

При переході на першу зону керівні імпульси знімаються з тиристорів плечей 1, 2, а на тиристори плечей 5, 6 подаються імпульси, регульовані по фазі. При зменшенні фази α_p до $\frac{\pi}{2}$ рекуперація припиняється.

7. Розрахунок зовнішньої характеристики ВП в режимі рекуперативного гальмування

Зовнішня характеристика випрямляча розраховується за формулою:

$$U_d = U_{d\alpha} - \Delta U_k + \Delta U_r + \Delta U_b + \Delta U_{zp} \quad (32)$$

Зовнішня характеристика перетворювача, тобто залежність напруги, підведеної до ТЕД від їх навантаження:

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \frac{1 + \cos(\delta_0)}{2} \quad (33)$$

де $\delta_0 = 10$ ел. гр. – кут запасу інвертора.

Всі величини, які входять до виразу (32), крім $\Delta U_{zp} = \left(\frac{R_d + R_\delta}{2}\right) \cdot I_d \cdot K_{def}$ визначаються за тими ж самими формулами, що і при розрахунку зовнішньої характеристики випрямляча.

Результати розрахунку зовнішньої характеристики випрямляча заносимо до таблиці 7.

Таблиця 7. Зведена таблиця величин ВП в режимі рекуперації

Позначення	Одиниці виміру	Зона регулювання			
		1	2	3	4
U_2	В				
I_d	А				
U_{k3}	%				
x_2	Ом				
L_d	мГн				
$K_{ПФ}$	-				
K_T	-				
R_T	Ом				
K_{ef}	-				
K_{def}	-				

U_{d_a}	В				
ΔU_k	В				
ΔU_R	В				
ΔU_B	В				
U_d	В				

По результатах розрахунку будують зовнішню характеристику ВПІ в режимі рекуперації

8. Розрахунок характеристик струму ТЕД і гальмівних характеристик електровоза при рекуперативному гальмуванні

Питома е.р.с. при рекуперативному гальмуванні може бути знайдена з швидкісної характеристики ТЕД для номінальної напруги U_H .

Характеристики струму при рекуперативному гальмуванні є залежності струму ТЕД від швидкості руху і розраховуються для кожної з чотирьох зон регулювання при струмах збудження, рівних 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 А.

Враховуючи, що струмові характеристики ТЕД при рекуперації прямолінійні, розрахунок ведеться для двох точок: $I_{дв} = 0$; $I_{дв} = I_{\Gamma}$ де I_{Γ} – струм годинного режиму ТЕД.

Швидкість електровоза визначається за формулою:

$$v = \frac{E}{C_{v\Phi}}, \quad (34)$$

де E - е.р.с. ТЕД, В;

$C_{v\Phi}$ - питома е.р.с. ТЕД, $\frac{В \cdot з}{км}$.

Е.р.с. ТЕД в генераторному режимі:

$$E = U_{дв} + I_{дв} \cdot R_{дв}, \quad (35)$$

де $U_{дв}$ – напруга на ТЕД, яка відповідає гальмівному струму $I_{дв}$ і визначається за зовнішньою характеристикою ВПІ $U_{дв} = f(I_{дв})$ відповідної зони регулювання.

Розрахована е.р.с. для зони регулювання заноситься до таблиці 8 при $I_{дв} = 0$ і $E = U_{дв}$

Результати розрахунку характеристик струму ТЕД для заданої зони регулювання при струмі збудження $I_3 = I_{\Gamma}$ заноситься до табл. 8, а для $I_3 < I_{\Gamma}$ четвертої зони – до табл.9.

Таблиця 8 . Характеристики струму ТЕД для чотирьох зон регулювання

	I зона		II зона		III зона		IV зона	
	$I_{ДВ}=0$	$I_{ДВ}=I_{Г}$	$I_{ДВ}=0$	$I_{ДВ}=I_{Г}$	$I_{ДВ}=0$	$I_{ДВ}=I_{Г}$	$I_{ДВ}=0$	$I_{ДВ}=I_{Г}$
$U_{ДВ}, В$								
$I_{ДВ} \cdot R_{ДВ}, В$								
$E, В$								
$Cv\Phi, В \cdot Г/км$								
$v, км/Г$								

Таблиця 9. Характеристики струму ТЕД для четвертої зони регулювання

$I_3, А$		300	400	500	600	700	800
$Cv\Phi, В \cdot Г/км$							
$I_{ДВ}=0$	$E, В$						
	$v, км/Г$						
$I_{ДВ}=I_{Г}$	$E, В$						
	$v, км/Г$						

9. Гальмівні характеристики електровоза при рекуперативному гальмуванні

Гальмівна сила електровоза визначається за формулою

$$B_{Г} = m \cdot (3,67 \cdot Cv\Phi \cdot I_{ДВ} + \Delta B), \quad (36)$$

де m – кількість осей локомотива;

B – гальмівне зусилля ТЕД, яке обумовлене механічними та магнітними втратами.

Для спрощення розрахунку приймаємо, що ΔB складає приблизно 5% від електромагнітного гальмівного зусилля. Тоді

$$B_{Г} = m \cdot 3,85 \cdot Cv\Phi \cdot I_{ДВ}, \quad (37)$$

Результати розрахунку гальмівних характеристик електровоза заносять до таблиці 10. Гальмівна сила електровоза при струмі якоря, рівному нулю, приймається також рівною нулю. Розрахунок гальмівної сили $B_{Г}$ виконується тільки для струму якоря $I_{ДВ} = I_{Г}$. При $I_3 = I_{Г}$ значення B_2 є однаковим для всіх зон регулювання.

Таблиця 10. Гальмівні характеристики електровоза

I_3, A	300	400	500	600	700	800	905
$C_V \Phi, B \cdot \Gamma / \text{км}$							
$B_{\Gamma}, \text{кН}$							
$v, \text{км/Г}$							

10. Розрахунок обмеження по зчепленню

Сила зчеплення коліс з рейками при рекуперативному гальмуванні

$$B_{зч} = \psi' \cdot P, \quad (38)$$

де ψ' – розрахунковий коефіцієнт зчеплення в режимі гальмування;

P – зчіпна вага електровоза, Н.

$$\psi' = 0,8 \cdot \psi_k, \quad (39)$$

де ψ_k – розрахунковий коефіцієнт зчеплення в режимі тяги

Результати розрахунку заносять до табл. 11. Значення максимального гальмового струму за умовами зчеплення визначаються за формулою (37).

Таблиця 11. Обмеження по зчепленню при рекуперативному гальмуванні

$v, \text{км/Г}$	0	10	20	30	45	55
ψ'						
$B_{зч}, \text{Н}$						
$I_{дв}, A$						

Обмеження гальмівного струму по зачепленню для $I_3 < I_{\Gamma}$ можуть бути побудовані по точках перетину характеристик $B = f(v)$ з обмеженням по зчепленню $B_{зч} = f(V)$.

11. Обмеження гальмівного струму по комутації

Обмеження гальмівного струму по комутації розраховується, виходячи з умови

$$\frac{I_3}{I_{дв}} = 0,7. \quad (40)$$

Використовуючи струми збудження I_3 з табл. 10, за формулою (40) визначаються відповідні струми якоря ТЕД, а потім за формулою (34) – значення швидкості електровоза.

Результати розрахунку заносяться до табл. 12.

Таблиця 12. Обмеження по комутації при рекуперативному гальмуванні

Обмеження по комутації гальмівних характеристик електровоза будуються за точками перетину даного обмеження з характеристиками струму ТЕД в режимі рекуперативного гальмування.

I_3, A	300	400	500	600	700	800
$C_{r\Phi}, B \cdot \Gamma / \text{км}$						
$I_{дв}, A$						
$v, \text{км} / \Gamma$						
$B_{\Gamma}, \text{кН}$						

Порядок виконання роботи:

1. Виконати розрахунок значень середньої випрямленої напруга неробочого ходу залежно від кута фазового регулювання α в межах зон.
2. Розрахунок коефіцієнтів потужності, тривалостей комутації та струмів комутації для відповідних зон регулювання напруги при α_p .
3. Розрахунок та побудова зовнішньої характеристики ВІП в режимі тяги із заповненням таблиці 3.
4. Розрахунок числа послідовно та паралельно увімкнених тиристорів в плечах ВІП.
5. Розрахунок і побудова швидкісної і електротягової характеристик ТЕД при номінальній напрузі.
6. Розрахунок і побудова залежності питомої е.р.с. від струму збудження I_3 із заповненням таблиці 4.
7. Перерахунок швидкісних характеристик ТЕД при живленні від ВІП для значень коефіцієнта ослаблення поля β_H та β_1 із заповненням таблиці 5.
8. Розрахунок обмежень швидкісних характеристик ТЕД по струму із заповненням таблиці 6.
9. Розрахунок зовнішньої характеристики ВІП в режимі рекуперативного гальмування та заповнення таблиці 7. Побудова графіка $U_d(I_d)$.
10. Розрахунок характеристик струму ТЕД, заповнення таблиці 8.
11. Розрахунок характеристик струму ТЕД для четвертої зони регулювання, заповнення таблиці 9, побудова графіків $v(I_d)$ для чотирьох зон регулювання напруги.
12. Розрахунок гальмівної сили B_{Γ} , заповнення таблиці 10.
13. Розрахунок обмеження по зчепленню при рекуперативному гальмуванні, заповнення таблиці 11, побудова гальмівної характеристики $B = f(v)$.
14. Розрахунок обмеження по комутації при рекуперативному гальмуванні (таблиця 12) та нанесення його на графік $B = f(v)$.

Література:

1. Дубровский З.М., Попов В.И., Тушканов Б.А. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Транспорт, 1998.—503 с.
2. Преобразовательная техника Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. — 2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1983. — 431 с.
3. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты: Учебник для вузов ж.-д. трансп.— 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1980. — 471 с.
4. Электронная и ионная техника Засорин С.Н. и др. — Изд. 2-е. — М.: Транспорт, 1973. — 440 с.

Навчально-методичне видання

Дубравін Юрій Федорович

Методичні вказівки до виконання контрольної роботи

Системи керування електрорухомим складом

для студентів спеціальності 7.05070203_«Електричний транспорт», спеціалізація «Електровози та електропоїзди» усіх форм навчання

Відповідальний за випуск Ю. Ф. Дубравін

Редактор Н. В. Щербак

Макет і верстка В. О. Андрієнка

Підписано до друку 30.06.2015
Формат – 60x84/16. Папір – офсетний.
Спосіб друку – ризографія
Замовлення № 97/15 . 40 прим.

Надруковано у Редакційно-видавничому відділі ДЕГУТ
Свідоцтво про реєстрацію від 27.12.2007 р. Серія ДК №3079
03049, Київ – 49, вул. Миколи Лукашевича, 19