МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання контрольної роботи

«РОЗРАХУНОК СХЕМ КЕРУВАННЯ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ РЕГУЛЮВАННІ НАПРУГИ ТА ОСЛАБЛЕННЯ МАГНІТНОГО ПОТОКУ ТЕД»

з дисциплін

«ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ», «ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ»

(для студентів 3,4 курсів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – «Електромеханіка» та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070203 – «Електричний транспорт»)

Харків
ХНУМГ
2014

Методичні вказівки до виконання контрольної роботи «Розрахунок схем керування при імпульсному регулюванні напруги та ослаблення магнітного потоку ТЕД» з дисциплін ”Електричне обладнання рухомого складу”, ”Електричне обладнання транспортних засобів” (для студентів 3 та 4 курсів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – «Електромеханіка» та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070203 – «Електричний транспорт») / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: В. П. Андрійченко, С. О. Закурдай. – Х.: ХНУМГ, 2014. – 26 с.

Укладачі: В. П. Андрійченко,
С. О. Закурдай.

Затверджено на засіданні кафедри електричного транспорту,
протокол № 1 від “27” серпня 2013 року.

ЗМІСТ

Вимоги до виконання контрольної роботи…….……4

Вихідні дані.....4

Завдання на контрольнуроботу.....6

1. Способи регулювання збудження тягових двигунів постійного струму……..……..…8

2. Розрахунок пускових струмів…….…….……..17

3. Розрахунок електромеханічних характеристик тягового електричного двигуна при регулюванні магнітного потоку……...19

4. Розрахунок статичних характеристик імпульсного регулювання збудження……..…..……....22

5. Побудова пускової діаграми…….…….…….23

ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольна робота складається з наступних розділів:

- розрахунку пускових струмів рухомого складу,
- розрахунку електромеханічних характеристик двигуна при заданому коефіцієнті регулювання збудження,
- розрахунку та побудові статичних характеристик імпульсного регулювання збудження,
- розрахунку та побудові пускової діаграми.

ВИХІДНІ ДАНІ

Розрахунок електрообладнання рухомого складу виконується за вихідними даними:

1. Тип рухомого складу: трамвай Т-3М, тролейбус ЗіУ-10, тролейбус ПМЗ-Т1
2. Тип тягового електродвигуна: ТЕ-022Е, ДК-210А-3, ДК-138А
3. Вага тари G_m, кН
4. Прискорення a, м/с^2
5. Наповнення M, людін.
6. Мінімальний коефіцієнт регулювання збудження, тип регулятора.

Робота тягових двигунів характеризується залежностями частоти обертання якоря n, обертаючого моменту $M_Д$ та коефіцієнта корисної дії $\eta_Д$ від струму I, який протікає у колі обмотки якоря. Ці залежності називають електромеханічними характеристиками. Вони також складають вихідні дані для розрахунків.

В таблиці 1.1 наведено електромеханічні характеристики тягових двигунів ТЕ-022Е (трамвайний вагон Т-3М), ДК-210А-3 (тролейбус ЗіУ-10), ДК-138А (тролейбус ПМЗ-Т1).

Таблиця 1.1 – Дані для побудови електромеханічних характеристик ТЕД

Тяговий електродвигун ТЕ-022Е (трамвайний вагон Т-3М)			
	$\alpha=1$		
$I_Д$,А	$V_{пп}$, км/г	$F_{пп}$, кН	$\eta_Д$
50	51,0	0,80	0,85
75	44,0	1,75	0,90
100	38,0	2,75	0,91
150	31,5	4,75	0,90
200	28,0	7,0	0,88
250	25,5	9,30	0,86
300	23,5	12,0	0,85
350	22,0	-	0,84
Тяговий електродвигун ДК-210А-3 (тролейбус ЗіУ-10)			
	$I_Ш=2А$, $\alpha=1$		
$I_Д$,А	$V_{пп}$, км/г	$F_{пп}$, кН	$\eta_Д$
100	27,0	7,5	0,88
200	22,5	16,0	0,90
300	19,0	28,0	0,87
400	18,0	40,0	0,86
450	17,0	-	0,85
Тяговий електродвигун ДК-138А (тролейбус ПМЗ-Т1)			
	$I_Ш=2А$, $\alpha=1$		
$I_Д$,А	$V_{пп}$, км/г	$F_{пп}$, кН	$\eta_Д$
100	27,0	8,5	0,89
200	23,0	18,0	0,91
300	21,0	30,0	0,90
400	19,0	42,0	0,89
500	18,0	54,0	0,87

ЗАВДАННЯ НА КОНТРОЛЬНУ РОБОТУ

№ п/п	П.І.Б.	Тип рухомого складу	Схема	Тип ТЕД	G_T, кН	а, м/с^2	α	М, люд.
1		Т-3М	1.6 а	ТЕ-022	160	1,81	0,45	185
2		ЗіУ-10	1.6 б	ДК-210	110	1,3	0,35	95
3		ПМЗ-Т1	1.6 б	ДК-138А	100	1,4	0,36	80
4		Т-3М	1.6 а	ТЕ-022	165	1,75	0,46	160
5		ЗІУ-10	1.6 б	ДК-210	95	1,31	0,31	105
6		ПМЗ-Т1	1.6 б	ДК-138А	105	1,45	0,33	85
7		Т-3М	1.6 а	ТЕ-022	170	1,69	0,47	165
8		ЗІУ-10	1.6 б	ДК-210	120	1,25	0,34	90
9		ПМЗ-Т1	1.6 а	ДК-138А	110	1,5	0,35	90
10		Т-3М	1.6 б	ТЕ-022	175	1,81	0,48	160
11		ЗІУ-10	1.6 а	ДК-210	125	1,24	0,32	85
12		ПМЗ-Т1	1.6 б	ДК-138А	115	1,6	0,33	95
13		Т-3М	1.6 а	ТЕ-022	195	1,55	0,49	190
14		ЗІУ-10	1.6 б	ДК-210	108	1,23	0,36	105
15		ПМЗ-Т1	1.6 а	ДК-138А	120	1,8	0,32	100
16		Т-3М	1.6 б	ТЕ-022	185	1,75	0,45	180
17		ЗІУ-10	1.6 а	ДК-210	115	1,35	0,31	109
18		ПМЗ-Т1	1.6 б	ДК-138А	100	1,5	0,4	90
19		Т-3М	1.6 а	ТЕ-022	180	1,61	0,46	180
20		ЗІУ-10	1.6 б	ДК-210	105	1,32	0,32	110
21		ПМЗ-Т1	1.6 а	ДК-138А	112	1,37	0,34	98
22		Т-3М	1.6 б	ТЕ-022	180	1,8	0,47	175
23		ЗІУ-10	1.6 а	ДК-210	125	1,28	0,37	90
24		ПМЗ-Т1	1.6 б	ДК-138А	100	1,5	0,35	85
25		Т-3М	1.6 а	ТЕ-022	167	1,9	0,48	140

Розрахунок та побудова статичних характеристик імпульсного регулювання збудження $\alpha(\gamma)$ виконується для таких відношень опорів $R_з/R_ш = 0,05$ та $R_з/R_ш = 0,2$.

Таблиця 1.2 – Технічні дані тягових електричних двигунів рухомого складу міського електротранспорту

Технічні параметри ТЕД	**Тип тягового електродвигуна**		
	ДК-210А-3	**ДК-138А**	**ТЕ-022Е**
Напруга на колекторі двигуна, $U_{дв}$, *В*	550	550	275
Часова потужність *Р*, *кВт*	110	132	45
Часовий струм $I_{г,}$ *А*	220	260	160
Опір обмотки якоря R_a, *Ом*	0,0816	0,0734	0,0745
Опір головних полюсів $R_{гп}$, *Ом*	0,063	0,057	0,0335
Опір додаткових полюсів $R_{дп}$, *Ом*	0,0465	0,0419	0,0335
Опір серієсної обмотки R_c, *Ом*	0,063	0,057	0,0335
Опір шунтової обмотки, *Ом*	95	95	-
Кількість витків обмотки послідовного збудження, W_C	24	24	20
Кількість витків обмотки паралельного збудження, $W_Ш$	930	930	-
Кількість колекторних пластин, *К*	175	175	145
Кількість провідників якірної обмотки, N_a	350	350	290
Кількість пар полюсів, *р*	2	2	2
Кількість пар паралельних гілок обмотки якоря, *m*	1	1	1

1. СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Процес пуску рухомого складу міського електричного транспорту можна розділити на дві стадії: першу, при якій змінюється напруга на якорі тягового двигуна, і другу, коли регулюється його магнітний потік.

Регулювання швидкості рухомого складу з тяговими двигунами (ТЕД) постійного струму за рахунок зменшення магнітного потоку можна виконувати одним з наступних способів:

- відключенням частини витків обмотки послідовного збудження;
- паралельним приєднанням до обмотки послідовного збудження активних опорів;
- регулюванням величини струму в обмотці паралельного збудження (у ТЕД змішаного збудження);
- комбінацією другого та третього способів;
- регулюванням струму за допомогою спеціального збуджувача;
- імпульсним регулюванням струму збудження (при використанні тиристорних або транзисторних перетворювачів).

Оскільки визначається величиною намагнічуючої сили ТЕД, ступінь ослаблення поля(ОП) можна оцінити коефіцієнтом регулювання:

$$\alpha = \frac{F_{ОП}}{F_{ПП}} \ , \tag{1.1}$$

де $F_{ОП}, F_{ПП}$ – намагнічуючі сили на ослабленому і повному полі.

Коефіцієнт α звичайно менше одиниці і може вимірюватися як у відсотках, так і у відносних одиницях. Відношення намагнічуючих сил дорівнює відношенню магнітних потоків на прямолінійній ділянці характеристики намагнічування. На насиченій частині кривої за умовами однакової зміні намагнічуючих сил , магнітний потік змінюється менше.

При регулюванні поля відключенням частини витків головного полюса коефіцієнт регулювання збудження:

$$\alpha = \frac{F_{ОП}}{F_{ПП}} = \frac{I \cdot w_1}{(I \cdot w)} = \frac{w_1}{w} \ , \tag{1.2}$$

де w_1 – число витків, що залишилося після відключення;

w – повне число витків обмотки збудження.

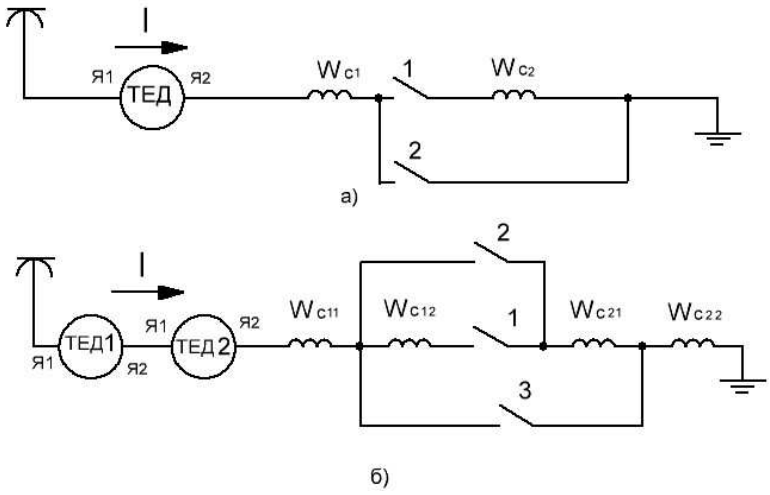

Рис. 1.1 – Схеми ослаблення поля відключенням частини витків обмотки збудження

Секція обмотки збудження, що виключається, повинна бути від'єднана від кола, інакше вона виявиться замкнутою закоротко і при різких змінах струму ТЕД у ній буде наводитися електрорухома сила взаємоіндукції, як у вторинній обмотці трансформатора. Оскільки частина обмотки закорочено, в ній виникають струм і намагнічуюча сила, яка буде спрямована зустрічно потоку збудження обмотки, що залишилася. У результаті буде затримуватися процес зміни магнітного потоку і при різких коливаннях напруги в контактній мережі може бути порушена нормальна комутація і виникнути коловий вогонь на колекторі тягового електродвигуна.

Спосіб регулювання швидкості відключенням частини витків обмотки збудження застосовують звичайно при відносно неглибокому ослабленні поля, коли ослаблення виконується в одну ступень (див. рис. 1.1, а.).

В тягових електроприводах, які мають декілька ТЕД, (див. рис. 1.1, б) можна зменшити процес коливання сили тяги при переході на ОП, якщо виконувати відключення обмоток по черзі. При цьому якщо двигуни з'єднані послідовно - буде значна різниця в напругах живлення якорів, а якщо паралельно, то виникає різниця струмових навантажень. На рисунку 1.1, б наведено двоступінчастий перехід. При цьому на початку включається контактор *2* і відключається контактор *1,* виводячи частину витків обмотки двигуна першого W_{C12}, а потім включається контактор *3* і відключається контактор *2,* виводячи частину витків другого двигуна W_{C21}. При цьому перша ступінь ослаблення поля використовується як перехідна.

Виконуючи певним чином переключення в обмотці збудження і підбираючи певне число витків у секціях, можна досягти регулювання ослаблення поля в досить широкому діапазоні (див. рис. 1.2).

При кількості витків першої секції в два рази більше кількості витків другої секції $W_1 = 2W_2$ схема дозволяє ослабити поле до 33 % третьої ступені. На першій ступені ослаблення поля відключається друга секція: контактор *2* включений, а контактор *1* – відключений, при цьому $\alpha = \frac{2}{3} = 66{,}6\%$. На другій ступені ослаблення поля обмотки включені паралельно з контакторами *2* і *3*, при цьому: $\alpha = 2 \cdot \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = \frac{4}{9} = 44{,}4\%$. На третій ступені відключається контактором *2* перша секція обмотки і виходить $\alpha = \frac{1}{3} = 33{,}3\%$.

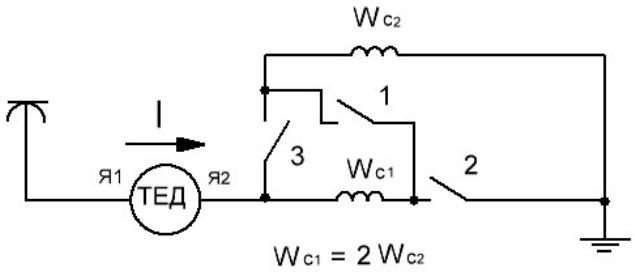

Рис. 1.2 – Схема ослаблення збудження переключенням обмоток

При використанні для шунтуючих резисторів залишається незмінним число витків, а змінюється струм обмотки збудження, тому

$$\alpha = \frac{I_з}{I}\frac{\mathrm{w}}{\mathrm{w}} = \frac{I_з}{I}, \qquad (1.4)$$

де $I_з, I$ – відповідно струм збудження і струм якоря тягового електродвигуна.

Величину коефіцієнта регулювання збудження можна також визначити за співвідношенням опорів обмотки збудження $r_з$ і кола шунта $r_ш$.

Падіння напруги при паралельному включенні:

$$I_з \cdot r_з = I_ш \cdot r_ш = \mathrm{I} \cdot r_\Sigma \ , \qquad (1.5)$$

де $r_\Sigma = \frac{r_з \cdot r_ш}{r_з + r_ш}$ – еквівалентний опір кола збудження

При підстановці значення еквівалентного опору кола збудження в формулу (1.5) отримаємо рівняння:

$$I \cdot \frac{r_з \cdot r_ш}{r_з + r_ш} = I_з \cdot r_з \ . \qquad (1.6)$$

Поділивши рівняння (1.6) на $I \cdot r_з$ маємо:

$$\frac{I_з}{I} = \frac{r_ш}{(r_з + r_ш)} \quad , \qquad (1.7)$$

або

$$\alpha = \frac{r_ш}{(r_з + r_ш)} \quad . \qquad (1.8)$$

З рівняння (1.8) видно, що змінюючи опір $r_ш$ можна одержати будь-яку величину коефіцієнта ослаблення поля. Звичайне ослаблення поля здійснюють ступінчастою зміною опору $r_ш$.

На рисунку 1.3 показана одна ступінь ослаблення поля з використанням активного опору.

За допомогою додаткових контакторів можна одержати практично будь-яке число ступенів ослаблення поля.

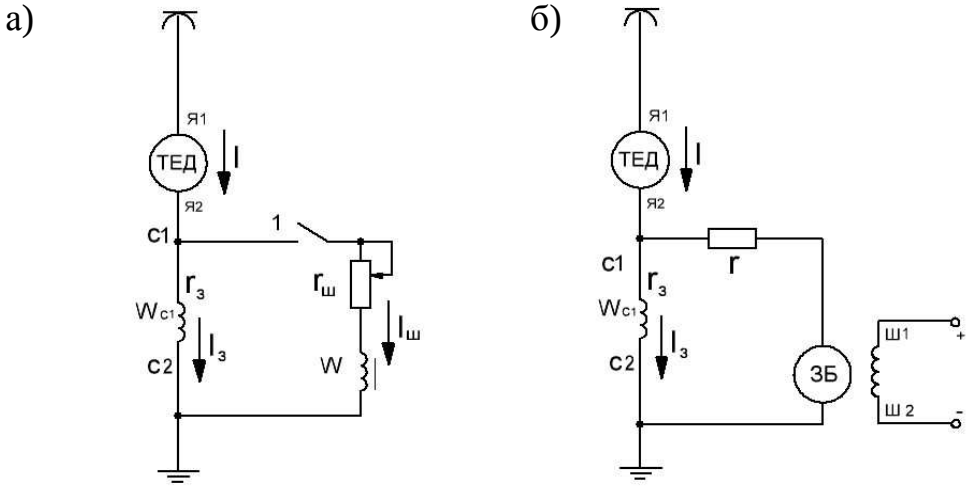

Рис. 1.3 – Схеми ослаблення збудження:

а) з використанням активного опору, б) з використанням збуджувача

Система плавного регулювання струму збудження з використанням спеціального збуджувача надано на рисунку 1.3, б.

Принцип дії такого способу полягає в тому, що паралельно обмотці збудження *С1-С2* через додатковий резистор *R* підключається спеціальний збуджувач В. Змінюючи струм збудження збуджувача, можна регулювати ослаблення поля тягового двигуна. Такий збуджувач конструктивно може бути виконаний як електромашинним, так і напівпровідниковим. Схема знайшла застосування на електрорухомому складі при необхідності зміни збудження двигунів послідовного збудження в режимі рекуперації. Резистор *R* необхідний, щоб від одного збуджувача можна було здійснювати живлення декількох обмоток паралельно включених тягових електродвигунів.

Вказані способи регулювання збудження мають такі переваги та недоліки:

- при регулюванні поля з використанням переключення обмоток тягового електродвигуна необхідно мати додаткові виводи від обмоток збудження, що приводить до деякого збільшення радіальних розмірів, ваги й ускладненню конструкції тягового електродвигуна. Але при використанні секціонування обмоток виходять більш стабільні швидкісні й тягові характеристики ТЕД, тому що на ступінь ослаблення поля практично не впливає температура обмоток збудження;
- при регулюванні поля з використанням активних опорів крім резисторів і контакторів потрібні додаткові апарати - індуктивні шунти. Також при використанні резисторів на відхилення характеристик від розрахункових впливає температура обмоток, опір контактів і проводів у силовому колі, а також допуски на шунтуючі опори. Крім того в цьому разі відбуваються втрати енергії в опорах ослаблення поля.
- до недоліків перерахованих схем також необхідно віднести той факт, що струм якоря двигуна при ослабленні поля змінюється східчасто, що призводить до збільшення динамічних навантажень в тяговій передачі рухомого складу.

Спосіб регулювання магнітного потоку для тягових електродвигунів змішаного збудження залежить від його виконання. При перевазі намагнічувальної сили паралельної обмотки збудження, ослаблення поля здійснюється зменшенням струму в ній.

При переважанні намагнічувальної сили послідовної обмотки збудження звичайно перша ступінь ослаблення поля виконується відключенням шунтової обмотки, а наступні ступені - шляхом шунтування серієсної обмотки активним опором.

При імпульсному регулюванні збудження паралельно обмотці збудження підключають імпульсний електронний регулятор, що діє як шунтуючий опір. Завдяки своїй швидкій дії імпульсний регулятор дозволяє зберегти чіткий розподіл струму якоря між обмоткою збудження і регуляторів перехідних режимів, що важливо для доброї комутації ТЕД.

В транспортних електроприводах, в яких використовуються ТЕД постійного струму, при імпульсному регулюванні напруги в режимах тяги та гальмування, можуть знайти застосування наступні способи регулювання збудження тягових двигунів:

– живлення обмоток збудження від незалежного регульованого перетворювача постійного струму, що складається з інвертора, трансформатора регульованих випрямлячів;

– східчасте контакторне зменшення струму збудження, при якому щоб уникнути поштовхів струму якоря необхідно поєднувати з короткочасним зменшенням вихідної напруги імпульсного перетворювача;

- плавне ослаблення збудження за допомогою спеціального імпульсного регулятора;

– плавне ослаблення збудження за допомогою окремого тиристора, переключення якого виконується комутуючими колами основного переривача (регулятора напруги);

– спільне імпульсне регулювання напруги і збудження тягових двигунів.

Останні чотири способи регулювання збудження - специфічні для імпульсного керування.

Застосування незалежного перетворювача постійного струму може виявитися вигідним у тих випадках, коли цей перетворювач використовують для живлення не тільки обмоток збудження тягових двигунів, але і допоміжних машин і інших споживачів.

Основна перевага регулювання збудження за допомогою системи східчастого контакторного ослаблення збудження при одночасному зменшенні вихідної напруги переривача (див. рис.1.4) полягає в його простоті, а недолік - у деякому зменшенні середньої сили тяги. Після того як у процесі пуску вихідна напруга $U_{км}$ досягає найбільшого прийнятого значення, контактор $К_{ОП}$ підключає паралельно обмотці збудження *С1-С2* шунт $R_ш$. При цьому опір

шунта визначає ступінь ослаблення збудження. Зростанню струму якоря при цьому запобігає система автоматичного керування переривачем П (блоком керування СУ і датчиком струму ДС), що зменшує середнє значення вихідної напруги.

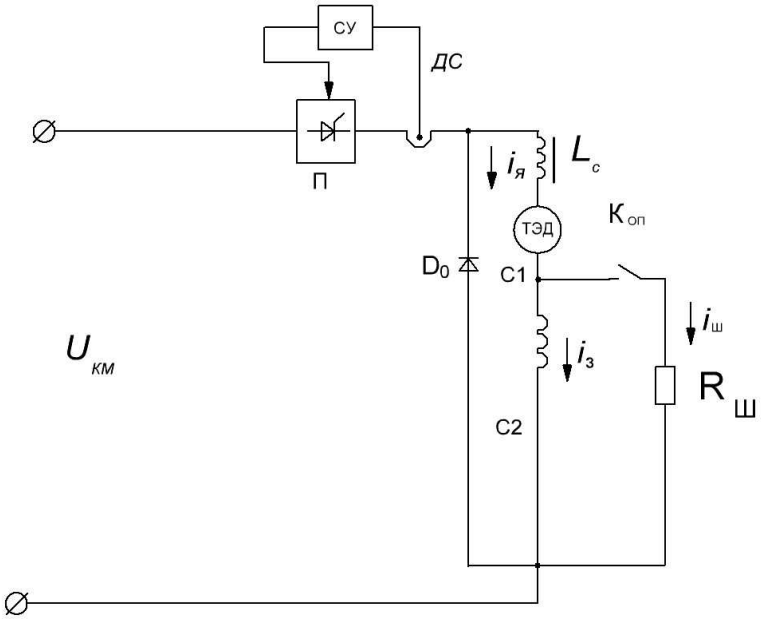

Рис. 1.4 – Принципова схема східчастого контакторного ослаблення збудження при одночасному зменшенні вихідної напруги переривача

В процесі розгону транспортного засобу система керування плавно збільшує вихідну напругу, і, коли вона знову досягає найвищого рівня, ТЕД виходить на швидкісну характеристику з ослабленим збудженням при напрузі $U_д$.

Регулювання поля збудження двигуна постійного струму послідовного збудження може бути здійснене за схемою, де переривач *П* включений послідовно (див. рис. 1.5, а) або паралельно (див. рис. 1.5, б) обмотці збудження *С1-С2*. У схемі (див. рис. 1.5, а) в інтервалі часу γT, коли переривач *П* знаходиться в провідному стані, через нього проходить струм збудження $i_п = i_з$, а струм у резисторі $R_ш$ дорівнює $i_ш = i_я - i_з$. До вентиля *Д* в цьому проміжку часу прикладені зворотна напруга і струм через нього не протікає. До обмотки збудження прикладена напруга $U_з=(i_я - i_з)R_ш$. В інтервалі часу $(1-\gamma)T$, коли переривач *П* знаходиться в непровідному стані, струм збудження замикається через вентиль *Д* и напруга на обмотці збудження дорівнює нулю. Струм у резисторі $R_ш$ у цьому проміжку часу дорівнює струму якоря $i_я$. Схема, яка представлена на рисунку 1.5, б простіша, тому що в ній відсутній вентиль *Д*, який шунтує обмотку збудження. У цій схемі в інтервалі часу γT струм

переривача *П* дорівнює різниці струмів якоря і збудження $i_п = i_я - i_з$. В інтервалі $(1-\gamma)T$ цій величині дорівнює струм резистора $R_ш$ і до обмотки збудження прикладена напруга $U_з=(i_я - i_з)R_ш$.

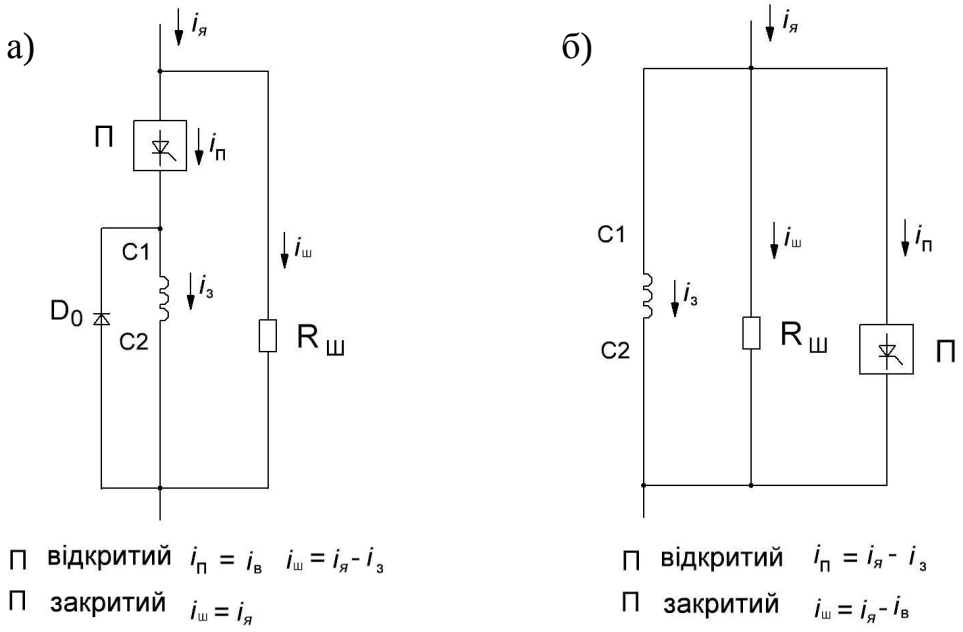

Рис. 1.5 – Схеми імпульсного регулювання струму ТЕД послідовного збудження з послідовним (а) і паралельним (б) підключенням переривачів

Основна відмінність між обома схемами полягає в тому, що в першій схемі при збільшенні коефіцієнта заповнення імпульсного циклу струм збудження $i_з$ зростає, а в другій - зменшується.

У схемі з послідовним перериваче м більшим є струм шунтуючого резистора, що призводить до додаткової втрати енергії, в порівнянні із схемою з паралельним перериваче м. У режимі тяги це небажано, але в режимі реостатного гальмування припустимо.

Якщо коефіцієнт регулювання збудження α змінюється в межах від 1 до 0,5, то в першій схемі переривач повинний забезпечити комутацію більшого струму, чим у другій.

Таким чином, більші переваги має схема з паралельним перериваче м, тому що в ній не потрібно застосовувати зворотний діод *Д*, менші втрати енергії в додатковому резисторі, комутується менший струм.

Однак у деяких випадках, наприклад при необхідності керування процесом самозбудження тягових машин на початку реостатного і рекуперативного гальмування, може знайти застосування також схема з послідовним перериваче м (див. рис. 1.5, а).

Змінити струм збудження можна зміною проміжку часу τ_{AT} між моментом відмикання тиристора *Т* и моментом запирання переривача *П*, коли під дією е.р.с. самоіндукції обмотки збудження *С1-С2* тиристор *Т* запирається. Зневажаючи, як і в попередніх випадках, порівняно незначними пульсаціями струмів якоря і збудження, можна прийняти, що в проміжку часу *Т—τ_AТ*, коли тиристор *Т* знаходиться в непровідному стані, струм через вентиль *Д1* дорівнює різниці струмів якоря і збудження.

Як видно з рис. 1.6, у цій схемі необхідно розрізняти два коефіцієнти заповнення: імпульсного циклу переривача $\gamma = \tau_A /$Т та імпульсного циклу тиристора $\gamma_m = \tau_{AT}/T$. Тиристор *Т* може бути відкритий тільки в той проміжок часу, коли переривач П знаходиться в провідному стані. В інший час до нього прикладена зворотна напруга, обумовлена е.р.с. самоіндукції обмотки збудження. Тому тривалість провідного стану тиристора *Т* може бути змінена лише в межах $0 \le \tau_A T \le \tau_A$, при цьому, коефіцієнт заповнення γ_{AT} не може бути більшим за γ.

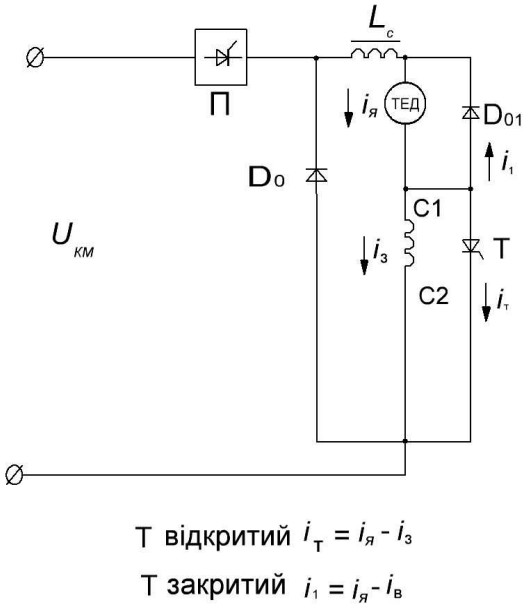

Рис. 1.6 – Схема плавного ослаблення збудження тиристором *Т*, який запираються в момент запирання переривача *П*

2. РОЗРАХУНОК ПУСКОВИХ СТРУМІВ

Завданням розрахунку є визначення струму $I_{n\,min}$ та $I_{n\,max}$, які відповідають точкам А і В пускової діаграми.

Сила тяги при зрушенні визначається за формулою:

$$F_{поч} = \frac{[102 \cdot (1+\gamma) \cdot a_1 + \omega_e(0)] \cdot G_m}{N}, \qquad (2.1)$$

де a_1 – пускове прискорення, a_1 = 0,3-0,4 м/с^2;

$(1+\gamma)$ – коефіцієнт інерції обертаючих мас, приймається:

для двохвісних тролейбусів: (1+γ) = 1,15;

для чотиривісних трамвайних вагонів: (1+γ) = 1,12;

G_m – вага тари рухомого складу, кН;

N – кількість двигунів, що встановлено на рухомому складі;

$\omega_e(0)$ – питомий опір руху на еквівалентному перегоні при швидкості, яка дорівнює нулю, Н/кн.:

для тролейбусів:

$$\omega_e(0) = 0{,}9\left(12 + 0{,}004 \cdot V^2\right) + i_e,$$

для трамвайних вагонів:

$$\omega_e(0) = 0{,}9\left(5 + 0{,}0031 \cdot V^2\right) + i_e$$

величина еквівалентного схилу приймається i_e=3 ‰

Виходячи з отриманого значення $F_{поч}$ по характеристиці сили тяги при повному полі визначається струм $I_{n\ min,}$ який відповідає точці A пускової діаграми. При цьому напруга на виході переривача повинна мати наступне значення:

$$U_{дв} = R_{дв} I_{n\,min.}, \qquad (2.3)$$

де $U_{дв}$ – напруга на тяговому електродвигуні;

$R_{дв}$ – сумарний опір двигуна, Ом:

$$R_{дв} = R_a + R_{гп} + R_{дп}, \qquad (2.4)$$

де R_a – опір якоря, Ом;

$R_{гп}$ – опір головних полюсів, Ом;

$R_{дп}$ – опір додаткових полюсів, Ом.

Складові частини сумарного опору електродвигуна обираються згідно визначеного типу рухомого складу.

Розрахункова вага рухомого складу визначається за формулою:

$$G_p = G_m + 9{,}81 \cdot M \cdot 75 \cdot 10^{-3}, \qquad (2.5)$$

де M – наповнення салону;

$75 \cdot 10^{-3}$ – вага одного пасажира, кН.

Максимальна пускова сила тяги для забезпечення розрахункового прискорення визначається :

$$F_{\max} = \frac{[102 \cdot (1+\gamma) \cdot a + \omega_e(V)] \cdot G_p}{N}, \qquad (2.6)$$

По графіку сили тяги для повного поля знаходимо величину струму $I_{n\ max}$, який забезпечує розрахункове прискорення при розгоні, та відповідає точці B пускової діаграми.

Значення цього струму повинно відповідати умові:

$$I_{n\ max} < I_{пр} \quad ,$$
$$I_{пр} = (1{,}8...1{,}9) \cdot I_г \, , \qquad (2.7)$$

де $I_{пр}$ – припустимий по умовам комутації струм двигуна;

$I_г$ – струм часового режиму, який обирається згідно визначено рухомого складу.

Максимальний пусковий струм $I_{n\ max}$ не повинний перевищувати припустимий по комутації струм тягового електродвигуна, який приймається в діапазоні $I_{пр} = (1{,}8...1{,}9) \cdot I_г$. Якщо ця умова не виконуються, максимальний струм необхідно зменшати до припустимої величини за рахунок корегування значення пускового прискорення та наповнення рухомого складу.

3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕД ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ЇХНЬОГО МАГНІТНОГО ПОТОКУ

Якщо відома швидкісна характеристика при $\alpha = 1$, перерахування її на коефіцієнт регулювання $\alpha \neq 1$ може бути зроблений на підставі наступних рівнянь.

Швидкість V_I на вихідній характеристиці при повному полі і струмі якоря $I = I_B$ дорівнює

$$V_I = \frac{U - (r_Я + r_з)I}{C\Phi_I}, \tag{3.1}$$

де $r_Я = r_{ОЯ} + r_{ДП}$ – опір обмотки якоря й обмотки додаткових полюсів (при двигунах з компенсаційною обмоткою варто враховувати і її опір);

$r_з$ – опір послідовної обмотки збудження;

Φ_I – магнітний потік при струмі якоря і струмі збудження, рівних I.

Швидкість $V'_{I/\alpha}$ при струмі збудження $I_B = I$ і струмі якоря I/α дорівнює:

$$V'_{I/\alpha} = \frac{U - (I/\alpha)(r_Я + \alpha r_з)}{C\Phi'_I}, \tag{3.2}$$

де Φ'_I – магнітний потік двигуна при струмі якоря I/α і МРС, що відповідає струму збудження $I_B = I$.

Розділивши вираз (3.1) на (3.2), одержуємо:

$$\frac{V'_{I/\alpha}}{V_I} = \frac{U - (I/\alpha)(r_Я + \alpha r_B)}{U - I(r_Я + r_B)} \cdot \frac{\Phi_I}{\Phi'_I}. \tag{3.3}$$

Права частина формули (3.3) близька до одиниці, тому що її чисельник і знаменник відрізняються друг від друга лише на різницю $r_Я I/\alpha - r_Я I = r_Я I(\frac{1}{\alpha} - 1)$. Магнітні потоки Φ'_I і Φ_I, що відповідають тим самим МРС головних полюсів, відрізняються тільки внаслідок різної реакції якоря.

Тому можна прийняти, що права частина виразу (3.3) дорівнює одиниці, а, отже $V'_{I/\alpha} \approx V_I$. Таким чином, швидкість $V'_{I/\alpha}$ при струмі якоря I/α і

коефіцієнті регулювання збудження α приблизно дорівнює швидкості V_I при $\alpha = 1$. Отже, для побудови кривої $V'_{I/\alpha}(I)$ при коефіцієнті регулювання $\alpha \neq 1$ необхідно абсциси кожної точки вихідної кривої $V_I(I)$, що відповідає нормальному збудженню $(\alpha = 1)$, змінити в $1/\alpha$ раз, як це показано для однієї точки на рисунку З 1.

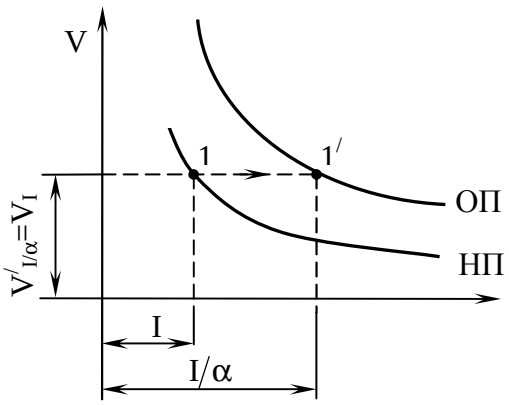

Рис. 3. 1 – Побудова швидкісної характеристики при ослабленні збудження

Для наближеного перерахування характеристики $F_K(I)$ сили тяги при коефіцієнті α регулювання збудження на підставі характеристики у випадку $\alpha = 1$ порівнюють ті ж режими, що і при перерахуванні швидкісної характеристики. При струмі якоря I/α і МРС головних полюсів, що відповідає струму збудження $I_B = I$, сила тяги.

$$F'_{K\,I/\alpha} = 3{,}6C\Phi'_I \cdot \frac{I}{\alpha} - \Delta F'_{K\,I/\alpha}, \qquad (3.4)$$

де $\Delta F'_{K\,I/\alpha}$ – зменшення сили тяги через магнітні і механічні втрати в двигуні і передачі при струмі якоря I/α і коефіцієнті регулювання збудження α.

По характеристиці $F_K(I)$ при $\alpha = 1$ струму якоря I відповідає сила тяги:

$$F_{KI} = 3{,}6C\Phi_I I - \Delta F_{KI}, \qquad (3.5)$$

де $\Delta F_{K\,I}$ – зменшення сили тяги через магнітні і механічні втрати в двигуні передачі при $\alpha = 1$ і струмі якоря I.

Якщо зневажати незначною різницею потоків $\Phi_I^{/}$ і Φ_I і втратами $\Delta F_{K\,I/\alpha}^{/}$ і $\Delta F_{K\,I}$ можна одержати наступне наближене співвідношення для визначення сили тяги:

$$F_{K\,I/\alpha}^{/} = F_{KI} / \alpha . \qquad (3.6)$$

Тому що при силах тяги $F_{K\,I/\alpha}^{/}$ і $F_{K\,I}$ струм якоря дорівнює відповідно I/α і I, а швидкості однакові: $V_{I/\alpha}^{/} = V_I$, то для перебудови характеристики $F_K(I)$ при $\alpha = 1$ на інше збудження треба змінити абсциси й ординати кожної точки цієї характеристики в $1/\alpha$ раз, як це показано для однієї точки на рисунку 3.2, а. Тягову характеристику $F_K(V)$ при $\alpha = 1$ перебудовують на інше збудження за допомогою зміни ординат усіх точок цієї кривої у $1/\alpha$ раз (див. рис. 3.2, б).

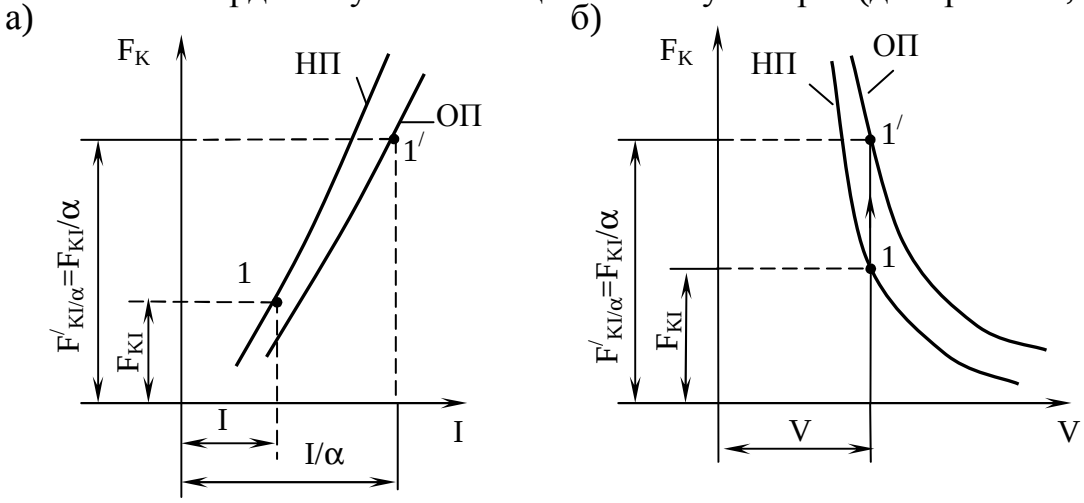

Рис. 3.2 – Перебудова характеристик $F_K(I)$ (а) і $F_K(V)$ (б), що відповідають нормальному полю, на ослаблене поле

Якщо вихідними є характеристика двигуна при коефіцієнті регулювання збудження $\alpha_0 \neq 1$, для перерахування її на коефіцієнт регулювання α використовують викладену вище методику, але замість коефіцієнта α підставляють в усі формули відношення α/α_0.

4. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ

В режимах пуску та електричного гальмування статичні характеристики імпульсного регулювання збудження тягових двигунів рухомого складу характеризуються залежністю коефіцієнта регулювання збудження від коефіцієнта заповнення імпульсного перетворювача α (γ).

Розглянемо принципи розрахунку статичних характеристик для схем, які наведені на рис. 1.5.

При знаходженні залежності α (γ) можна прийняти при відносно великій частоті регулювання постійним струм $I_з$ для фіксованого значення коефіцієнта регулювання збудження а також знехтувати індуктивністю щунтуючого кола. Завдяки прийнятим допущенням, та при незмінному пусковому струмі можна знайти для кожного значення коефіцієнта заповнення імпульсного перетворювача γ струм шунтуючого кола. Амплітуда імпульсу напруги $U_з$, яка прикладається до обмотки збудження дорівнює падінню напруги на резисторі $R_ш$, через який замикається різниця струмів $I_ш = I_я - I_з$. Падіння напруги на обмотці збудження:

$$U_з = R_ш (I_я - I_з) . \quad (4.1)$$

Середнє значення напруг, які прикладаються до обмотки збудження, для схем, що наведено на рисунку 1.6:

$$U_{з\,посл} = R_ш (I_я - I_з) \gamma , \quad (4.2)$$

$$U_{з\,пар} = R_ш (I_я - I_з)(1- \gamma) . \quad (4.3)$$

Середнє значення напруги кола збудження за період регулювання можна знайти як добуток еквівалентного опору на величину струму $I_ш = (I_я - I_з)$. Величина еквівалентного опору кола збудження за період регулювання може бути знайдена з використанням наступного виразу:

$$R_{екв.посл} = R_ш \gamma , \quad (4.5)$$

$$R_{екв.пар} = R_ш (1- \gamma) . \quad (4.6)$$

З урахуванням вище сказаного в коефіцієнт регулювання збудження при імпульсних схемах можна представити в наступному вигляді:

$$\alpha = R_{екв} / (R_{екв} + R_з) \quad . \tag{4.7}$$

Для послідовного та паралельного включення переривачів коефіцієнт регулювання збудження може бути знайдений за відповідними формулами:

$$\alpha_{посл} = \gamma / (\gamma + R_з / R_ш) \ , \tag{4.8}$$

$$\alpha_{пар} = (1-\gamma) / (1- \gamma + R_з / R_ш) \ . \tag{4.9}$$

З виразів (4.8) та (4.9) видно, що коефіцієнт регулювання збудження α нелінійно залежить від коефіцієнта заповнення імпульсного перетворювача γ. Характер кривої $\alpha(\gamma)$ залежить від схеми підключення перетворювача до обмотки збудження, а також від співвідношення активних опорів схеми.

5. ПОБУДОВА ПУСКОВОЇ ДІАГРАМИ

Пускова діаграма уявляє собою залежність струму двигуна від швидкості при пуску рухомого складу (див. рис. 5.1).

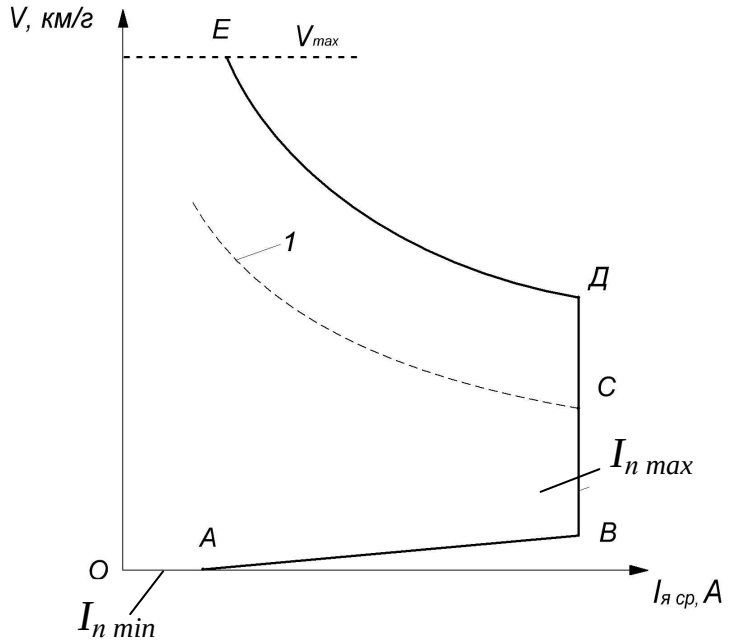

Рис. 5.1- Пускова діаграма при імпульсному регулюванні напруги та ослабленні поля ТЕД

При побудові пускової діаграми приймаються припущення:

1) пуск рухомого складу виконується при $I_{n\ max}$, що відповідає струму уставки відповідної позиції контролера водія і він є незмінним при розгоні в режимі повного поля ТЕД;

2) режим ослаблення ТЕД від $\alpha = 1$ до $\alpha = \alpha_{\min}$ виконується безсхідчасто з використанням імпульсних регуляторів при струмі $I_{n\ max}$.

3) темп наростання прискорення при зміні струму ТЕД від $I_{n\ min}$ до $I_{n\ max}$ виконується із значенням $К_а = 0{,}5 – 0{,}6$ м/с^3.

Для середнього значення струму $I_{сер} = (I_{n\ min} + I_{n\ max})/2$ по характеристиці сили тяги для повного поля визначається F, та розраховується прискорення a і прирощування швидкості ΔV. Значення прискорення знаходимо по формулі, *м/с*^{2}:

$$a = \frac{N \cdot F - \omega_0 \cdot G_p}{102 \cdot (1+\gamma) \cdot G_p}, \qquad (5.1)$$

де N – кількість двигунів на рухомому складі;

F – сила тяги, що визначається для струму $I_{сер}$ по характеристиці $F=f(I)$.

Приріст швидкості рухомого складу при зміні струму від $I_{n\ min}$ до $I_{n\ max}$ визначаємо за формулою *км/г :*

$$\Delta V = a \cdot \Delta t \cdot 3{,}6 \qquad (5.2)$$

Значення приросту швидкості ΔV відкладається на пусковій діаграмі і воно відповідає координатам точки ***В***.

Проміжок часу зміни струму від $I_{n\ min}$ до $I_{n\ max}$ визначаємо з урахуванням виразу:

$$\Delta t = (a_{\ min} + a_{\ max})/2\ К_а \quad . \qquad (5.3)$$

Побудова пускової діаграми в зоні ослаблення поля ТЕД виконується з урахуванням мінімального значення коефіцієнта регулювання збудження. Швидкісна характеристика, яка розрахована при мінімальному значенні коефіцієнта регулювання збудження, перетинається із $I_{n\ max}$ в точці ***Д*** пускової діаграми.

Закінченню розгону рухомого складу на повному полі відповідає точка *С* на пусковій діаграмі. Вона отримується на перетині швидкісної характеристики повного поля із $I_{n\,max}$.

Швидкісна характеристика, яка розрахована при мінімальному значенні коефіцієнта регулювання збудження, перетинається із $I_{n\,max}$ в точці ***Д*** пускової діаграми.

В результаті побудови пускової діаграми визначаються $I_{n\,min}$ та $I_{n\,max}$ при пуску і час роботи ТЕД з цими величинами струмів, який необхідний для розрахунків теплових параметрів напівпровідникових елементів імпульсних переривачів, які використовуються для регулювання напруги та струму збудження .

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання контрольної роботи

«РОЗРАХУНОК СХЕМ КЕРУВАННЯ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ РЕГУЛЮВАННІ НАПРУГИ ТА ОСЛАБЛЕННЯ МАГНІТНОГО ПОТОКУ ТЕД»

з дисциплін

«ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ», «ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ»

(для студентів 3,4 курсів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – «Електромеханіка» та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070203 – «Електричний транспорт»)

Укладачі: **АНДРІЙЧЕНКО** Володимир Павлович,
ЗАКУРДАЙ Світлана Олександрівна

Відповідальний за випуск *Ю. В. Мінєєва*

За авторською редакцією

Комп’ютерне верстання: *І. В. Волосожарова*

План 2013, поз. 122М

Підп. до друку 23.12.2013р.
Друк на ризографі.
Зам. №

Формат 60 х 84/16
Ум. друк. арк. 1,5
Тираж 100 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:
ДК №4064 від 12.05.2011